



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Fachbereich 13  
Bauingenieurwesen  
und Geodäsie

Institut für Verkehr

Fachgebiet  
Straßenwesen  
mit Versuchsanstalt

## **Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau**

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der  
Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des  
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Ulrike Stöckert**

aus Berlin

D 17

Darmstadt 2002

Referent: Prof. Dr.-Ing. Walter Durth

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Axel Tappert

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald

Tag der Einreichung: 19.06.2001

Tag der mündlichen Prüfung: 12.12.2001

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Verkehr, Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt der TU Darmstadt.

An dieser Stelle möchte ich allen Kollegen am Fachgebiet, besonders den Mitarbeitern im Labor der Versuchsanstalt herzlich für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Walter Durth für die stetige Förderung dieser Arbeit, die wertvollen Anregungen und Diskussionen und die Übernahme des Referates.

Herrn Professor Dr.-Ing. Tappert möchte ich für die Übernahme des Korreferates danken. Seine Unterstützung, die vielen fachlichen Ratschläge, Hinweise und Denkanstöße waren mir eine große Hilfe bei der Bearbeitung dieser Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bald möchte ich für die Übernahme des Korreferates, die interessanten Gespräche und Anregungen danken.

Besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Suß für die stetige Unterstützung meiner wissenschaftlichen Arbeit an der Versuchsanstalt. Von ihm konnte ich auf dem Gebiet des Straßenbaus sehr viel lernen. Mit der Einbeziehung in die Tätigkeit der FGSV und so manchen „Sprung ins kalte Wasser“ hat er mich gefordert und gefördert.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr.-Ing. Stefan Böhm für seinen fachlichen Rat und die vielen konstruktiven Diskussionen. Bei kniffligen Problemen war er mir immer ein guter Ratgeber.

Ebenso gebührt mein Dank den Herren Rainer Seehaus, Alois Bott und Erich Meyer. Sie standen mir vor allem als technische Berater zur Seite. Bei auftretenden Problemen konnte ich mich immer auf sie verlassen.

Den Wissenschaftlichen Hilfskräften Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Wolf, Herrn Holger Mix und Herrn Viktor Root möchte ich danken für ihre unermüdliche Hilfe bei den Laborarbeiten und Hilfestellungen bei der Auswertung der Ergebnisse.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei meinem Mann Ralph, meinen Eltern und Schwiegereltern bedanken. Sie waren mir auch in schwierigen Situationen eine moralische Stütze und haben mir vor allem in der „heißen Phase“ mit Rat und Kinderbetreuung sehr zur Seite gestanden.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Belastung des Straßenoberbaus	2
2.2	Auswirkungen der Belastung auf den Oberbau	3
2.3	Bemessung des Straßenoberbaus	4
2.4	Rechenprogramme zur Voraussage des Verhaltens des Oberbaus unter Berücksichtigung des Schichtenverbundes	8
2.5	Spannungsverlauf in Fahrbahnoberflächen in Abhängigkeit von der Größe des Schichtenverbundes - BISAR Berechnungen	10
<b>3</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>15</b>
3.1	Einflüsse auf den Schichtenverbund	15
3.2	Auswirkungen von Verbundstörungen	19
3.3	Anforderungen an den Schichtenverbund	25
3.4	Prüfung des Schichtenverbundes	30
<b>4</b>	<b>Methodik des Vorgehens</b>	<b>37</b>
4.1	Ziel und Abgrenzung der Untersuchungen	37
4.2	Untersuchungen zur Präzision des Verfahrens	39
4.2.1	Allgemeines	39
4.2.2	Herstellung homogener Probekörper	40
4.2.3	Festlegung der Meßbereiche	41
4.2.4	Untersuchungen zur Homogenität der Probekörper innerhalb der Meßbereiche	41
4.2.5	Planung und Durchführung der Ringanalyse	42
4.2.6	Ermittlung der Prüftoleranz unter Wiederhol- und Vergleich- bedingungen	43
4.2.7	Untersuchung des Einflusses einzelner Randbedingungen auf die Meßergebnisse	44
4.3	Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes	45
4.3.1	Auswahl und Beschreibung der untersuchten Strecken	45
4.3.2	Laboruntersuchungen	47
4.3.2.1	Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER	47
4.3.2.2	Beschreibung der Oberflächenstruktur der Schichtgrenzen	49
4.3.2.3	Asphaltuntersuchungen	50
4.3.3	Auswertung der Ergebnisse und Erarbeitung eines Bewertungs- hintergrundes	51
4.4	Zusätzliche Untersuchungen	52

4.4.1	Untersuchung der zeitlichen Entwicklung des Schichtenverbundes	52
4.4.2	Strecken mit Teilerneuerung	53
<b>5</b>	<b>Abschätzung der Präzision des Prüfverfahrens „Schichtenverbund nach LEUTNER“</b>	<b>53</b>
5.1	Festlegung der Meßbereiche	53
5.2	Untersuchungen zur Homogenität der Probekörper innerhalb der Meßbereiche	55
5.3	Ermittlung der Prüftoleranz unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen	59
5.3.1	Zusammenstellung der Einzelwerte	60
5.3.2	Ausreißerprüfung der Einzelwerte	60
5.3.3	Errechnung der Streumaße der Einzelwerte	60
5.3.4	Prüfung der Varianzen der Einzelwerte	60
5.3.5	Zusammenstellung der Ergebnisse	61
5.3.6	Ausreißerprüfung der Ergebnisse	61
5.3.7	Standardabweichung der Ergebnisse	63
5.3.8	Prüfung der Varianzen der Ergebnisse	64
5.3.9	Zusammenstellung der Zellenmittel	64
5.3.10	Ausreißerprüfung der Zellenmittel	65
5.3.11	Errechnung von Mittelwert, Standardabweichungen von Einzelwerten unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen sowie Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit für jedes Meßniveau	65
5.3.12	Überprüfung der Abhängigkeit der Standardabweichungen vom Zahlenwert des Ergebnisses	67
5.3.13	Ermittlung der Standardabweichung von Einzelwerten unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen	71
5.4	Überprüfung des Einflusses einzelner Randbedingungen auf die Meßergebnisse	73
5.4.1	Vorbetrachtungen	73
5.4.2	Einfluß verschiedener Randbedingungen auf die Prüfergebnisse	75
5.4.2.1	Einflußfaktor „Prüfpresse - maximale Bruchkraft“	77
5.4.2.2	Einflußfaktor „Abmessung des Schergerätes“	78
5.4.2.3	Einflußfaktor „Häufigkeit der durchgeführten Abscherversuche“	81
5.4.2.4	Zusammenfassung der varianzanalytischen Auswertung	83
5.4.3	Überprüfung der Einhaltung der Vorschubgeschwindigkeit	84
5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Ermittlung des Prüffehlers	86

<b>6</b>	<b>Erstellung eines Bewertungshintergrundes</b>	<b>87</b>
6.1	Zusammenhang zwischen Asphaltkenndaten, Oberflächenstruktur und Schichtenverbund	87
6.1.1	Zusammenhang zwischen Asphaltkenndaten und maximaler Scherkraft	87
6.1.2	Zusammenhang zwischen Oberflächen- und Asphaltkenndaten und maximaler Scherkraft	90
6.2	Analyse zur Qualität des erzielten Schichtenverbundes	97
6.3	Bewertungshintergrund	100
6.3.1	Schichtgrenze Asphaltdeckschicht - Asphaltbinderschicht	100
6.3.2	Schichtgrenze Asphaltbinderschicht - Asphalttragschicht	107
6.3.3	Schichtgrenze Asphalttragschicht - Asphalttragschicht	112
6.3.4	Einfluß des Abstandes der Bohrkernprofile auf das Ergebnis	116
6.3.4	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	118
6.4	Zusätzliche Untersuchungen	119
6.4.1	Die zeitliche Entwicklung des Schichtenverbundes	119
6.4.2	Schichtenverbund von Strecken mit Teilerneuerung	125
<b>7</b>	<b>Empfehlungen</b>	<b>128</b>
7.1	Präzision des Prüfverfahrens	128
7.2	Bewertungshintergrund	129
7.3	Arbeitsanleitung	130
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>131</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick</b>	<b>134</b>
	Literaturverzeichnis	135
	Abbildungsverzeichnis	141
	Tabellenverzeichnis	143
	Anlagenverzeichnis	145
	Anlagen	

## Verzeichnis der wichtigsten Abkürzungen

AB	Asphaltbeton	
ABI	Asphaltbinderschicht	
ADS	Asphaltdeckschicht	
ANOVA	Analysis of Variance	
ATS	Asphalttragschicht	
BISAR	Bitumen Structure Analysis in Roads	
BM	Baumaßnahme	
FEM	Finite Element Methode	
GA	Gußasphalt	
LSD	Least Significant Difference	
PK	Probekörper	
SMA	Splittmastixasphalt	
$\alpha$	Reibungskoeffizient	[-]
$\sigma_8$	Normalspannung auf der Oktaederfläche	[N/m <sup>2</sup> ]
$\tau_8$	Schubspannung auf der Oktaederfläche	[N/m <sup>2</sup> ]
$\mu$	Querdehnzahl	[-]
AK	Shear Spring Compliance	[m <sup>3</sup> /N]
ALK	Reduced Spring Compliance	[m]
E	E-Modul	[N/m <sup>2</sup> ]
$F_{\max}$	Maximale Bruchkraft	[kN]
$F_W$	Kraft im Wendepunkt	[kN]
q	Vertrauensbereich	
r	Wiederholbarkeit	kN bzw. mm
R	Vergleichbarkeit	kN bzw. mm
$s_{\max}$	Maximaler Scherweg	[mm]
$S_r$	Standardabweichung unter Wiederholbedingungen	kN bzw. mm
$S_R$	Standardabweichung unter Vergleichbedingungen	kN bzw. mm
$S_a$	Standardabweichung der Einzelergebnisse	kN bzw. mm



## 1 Einleitung

Die zunehmende Verkehrsdichte, ansteigende Achslasten sowie die fahrzeugbedingte Erhöhung des Reifeninnendruckes führen zu höheren Belastungen des Straßenkörpers. Um bei Asphaltbefestigungen die Bildung von Spurrinnen und Rissen zu vermeiden, ist ein guter Verbund aller Asphaltschichten notwendig. Mangelhafter Schichtenverbund verursacht Spannungsumlagerungen und -erhöhungen, wodurch bei ungünstigen Randbedingungen vorzeitig Verformungen (z.B. Spurrinnen), Aufwölbungen, seitliche Verschiebungen oder strukturelle Schädigungen in Form von Rissen, Ausbrüchen oder Abplatzungen auftreten können.

Die Prüfung des Schichtenverbundes erfolgt an aus Straßenkonstruktionen entnommenen Bohrkernen mit Hilfe des Schergerätes nach LEUTNER. Bis heute sind für den Schichtenverbund keine Anforderungen in die Technischen Regelwerke aufgenommen worden. In den derzeit gültigen „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 01)“ und den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau (ZTVT-StB 95)“ wird lediglich ein „ausreichender“ Schichtenverbund zwischen den Asphaltschichten gefordert.

Das Interesse der Fachgremien, vor allem aber der Straßenbauverwaltung, auch diese Kenngröße qualitativ und quantitativ erfassen und bewerten zu können, wächst zunehmend. Ein Indiz dafür ist die Festlegung von Abzügen gemäß bestehender Rundverfügungen in einigen Bundesländern (z.B. Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen), wenn Bohrkern bei der Entnahme im Rahmen der Kontrollprüfung zwischen den einzelnen Asphaltschichten keinen Verbund aufweisen. Die Straßenbauverwaltung in Brandenburg behält sich vor, den Schichtenverbund nach Leutner zu prüfen. Gemäß „Merkblatt für die Straßenplanung (ME 5.2.3, 1999)“ gilt der Verbund als ausreichend, wenn zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht eine Scherkraft  $\geq 25$  kN und zwischen Asphaltbinder- und Asphalttragschicht eine Scherkraft  $\geq 12$  kN erreicht wird.

Voraussetzung für die Aufnahme eines Prüfverfahrens in ein Technisches Regelwerk mit vertragsrelevanten Konsequenzen ist der Nachweis seiner prinzipiellen Eignung, ein bestehender Bewertungshintergrund und formulierte Anforderungswerte. Der Nachweis der Eignung der Prüfung des Schichtenverbundes mit dem Schergerät nach LEUTNER ist durch zahlreiche Forschungsarbeiten in den 80er (HIERSCHKE, 1988) und Anfang der 90er (CODJIA, 1994) Jahre erfolgt. Die Randbedingungen der Prüfung im

Labor wurden festgelegt und sind in der FGSV-Arbeitsanleitung ALP-A, Teil 4 (1999) beschrieben.

Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung der Präzision des Prüfverfahrens, die Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes und der Vorschlag von Anforderungswerten.

Die Arbeit basiert auf den Ergebnissen der Forschungsarbeit „Grundlagen zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund“, die im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen an der TU Darmstadt in den Jahren 1998 bis 2000 durchgeführt wurde.

## **2 Theoretische Grundlagen**

### **2.1 Belastung des Straßenoberbaus**

Die Beanspruchung der Asphaltkonstruktion wird durch die Art und Weise, wie Fahrzeuglasten in den Oberbau eingeleitet werden, bestimmt. Sie ist abhängig von Achs- und Radabständen, der Anzahl der Lastüberrollungen, Größe und Richtung der Radlast, der Radaufstandsfläche sowie den Drücken zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche. Radkräfte bestehen aus gleichbleibenden (konstanten) und dynamischen Komponenten. Sie werden durch verschiedene Faktoren wie der Fahrzeuggeschwindigkeit, dem Fahrzeuggewicht und der Straßenoberfläche beeinflusst. Gemäß dem Bericht der ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD, 1992) werden die aufgebrachten Radlasten unterschieden in:

- statische Lasten (stationär)
- quasi-statische Lasten (rollstatisch, bewegt aber konstant) und
- dynamische Lasten (bewegt und variabel).

Die statischen Achslasten sind vom Gesamtgewicht und dessen räumlicher Verteilung entlang der Längsachse sowie von der Positionierung der Achsen entlang derselben abhängig. Dieser vereinfachte Ansatz wird für die Bemessung herangezogen, stellt aber nur *eine* der zu den tatsächlichen Radlasten beitragenden Komponenten dar.

Bei quasi-statischen Lasten spielen Steifigkeit, Masse und Geometrie des sich bewegenden Fahrzeuges eine Rolle. Die Verlagerung der statischen Radlasten kann in zwei Grundrichtungen erfolgen: entlang des Fahrzeuges (Längsrichtung - zwischen den Achsen) und quer zum Fahrzeug (zwischen den Rädern, quer zu den Achsen). Der Fall Lastverlagerung in Längsrichtung tritt beispielsweise ein, wenn sich ein Fahrzeug auf einer schrägen Fläche bewegt. Bei einer Steigung von 10% verlagern sich bei einem zweiachsigen 16 Tonnen schweren Fahrzeug 0,6 Tonnen von der Vorder- auf die Hin-

terachse. Damit wird die hintere Achslast von 10 Tonnen auf 10,6 Tonnen erhöht (OECD, 1992). Beschleunigungs- und Bremsvorgänge stellen in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp (Konstruktion der Antriebsachse, Aufhängung etc.) immer eine Lastverlagerung dar. Bewegt sich ein Fahrzeug auf einer Straße mit Quergefälle, verlagert sich das Gewicht auf die talseitigen Räder des Fahrzeuges (seitliche Lastverlagerung). Dies bedeutet, Bezug nehmend auf das o.g. Beispiel eines 16 Tonnen schweren Fahrzeuges, daß bei einer vorhandenen Querneigung von 5% die talseitigen Räder nicht 8 Tonnen sondern 9,5 Tonnen Last aufnehmen (OECD, 1992).

Dynamische Lasten werden von der Trägheit, Dämpfung, Steifigkeit, Masse und Geometrie des Fahrzeuges und seiner Komponenten beeinflusst. Das auftretende dynamische Fahrzeugverhalten wird oft als Vertikaldynamik bezeichnet und umfaßt die Schwingungen und Vibrationen des Fahrzeuges und seiner Elemente. Aufgrund dieser Schwingungen weichen die von Rädern auf die Straße aufgebrachten Lasten gegenüber den statischen Werten nach oben und unten ab. Aufgrund zahlreicher Steifigkeits- und Trägheitselemente in einem Schwerfahrzeug ist die Vertikaldynamik ein sehr komplexes Geschehen. Die Wirkungen sollen nicht im einzelnen erläutert werden. Zu den Hauptwirkungen gehören niederfrequente und höherfrequente Schwingungsformen. Ein beladenes Fahrzeug schwingt auf seiner Aufhängung im Niederfrequenzbereich von 1,5 bis 4 Hz. Bekannte Schwingungsformen sind das „Rütteln“ und „Nicken“ eines Fahrzeuges auf seiner Aufhängung. Durch kurze, abrupte Unregelmäßigkeiten auf der Straßenoberfläche (z.B. Schlaglöcher) werden höherfrequente Schwingungsarten mit Frequenzen zwischen 10 und 15 Hz hervorgerufen. Strukturschwingungen des Rahmens von Schwerfahrzeugen tragen nur unwesentlich zu den bewegten dynamischen Radkräften bei (OECD, 1992).

Die in den Achsen durch Rahmenverbiegung aufgezwungene Bewegung ist im Vergleich zu den durch starke Resonanz gefederter und ungefederter Massen des festen Aufbaus verursachten Bewegungen als gering einzustufen.

Horizontale Lasten werden durch die gesamten in der Kurve auf das Fahrzeug wirkenden Querkräfte und die gesamten beim Bremsen und Beschleunigen wirkenden Längskräfte verursacht.

## **2.2 Auswirkungen der Belastung auf den Oberbau**

In den Asphaltsschichten des Oberbaus entstehen infolge der Verkehrsbelastung Spannungen und Verformungen. Spannungen werden in Schub- und Normalspannungen unterteilt. WEINHOLD und GERLACH (1965) haben an einem Element innerhalb der

Straßenbefestigung den qualitativen Spannungsverlauf infolge der vertikalen Beanspruchung bei Überfahrt eines Rades dargestellt (Abbildung 2-1).

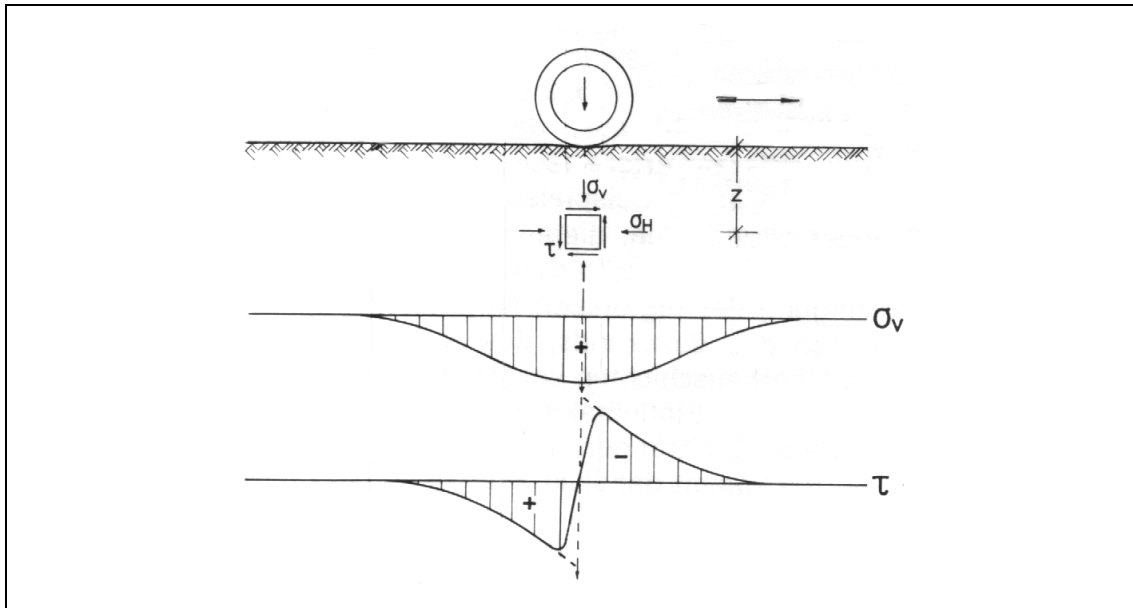


Abbildung 2-1: Qualitativer Vertikal- und Schubspannungsverlauf an einem Element innerhalb der Straßenbefestigung (WEINHOLD und GERLACH, 1965)

Die vertikale Druckspannung  $\sigma_v$  schwillt bis zu einem Höchstwert über dem Element an und fällt bei Entfernung des Rades wieder ab. Die Schubspannung  $\tau$  nimmt ebenfalls zu, wechselt über dem Element das Vorzeichen und nimmt dann dem Betrag nach wieder ab. Der Verlauf des Schubspannungswechsels ist abhängig von der Aufstandsfläche des Rades. Aus den Spannungen resultieren Verformungen, die sich aus reversiblen und irreversiblen Anteilen zusammensetzen. Bei Spannungseinwirkung entsteht neben der reversiblen Verformung ein Anteil an bleibender Verformung infolge des plastischen bzw. viskoelastischen Verhaltens von Asphalt. Bleibende Verformungen führen u.a. zur Bildung von Spurrinnen („Merkblatt über die mechanischen Eigenschaften von Asphalt“, FGSV, 1985).

## 2.3 Bemessung des Straßenoberbaus

Die mechanischen Beanspruchungen der Fahrbahnbefestigungen wirken im allgemeinen dreidimensional und sind schwer zu ermitteln und zu bewerten. Die Bemessung des Straßenoberbaus erfolgt mit Hilfe empirischer, halbtheoretischer und theoretischer Bemessungsverfahren. Empirische Verfahren berücksichtigen Baustoffeigenschaften, den Verkehr (Menge, Achslasten etc.) und Umwelteinflüsse. Sie basieren auf Erfahrungswerten.

Zur theoretischen Bemessung wird eine Beanspruchungsberechnung notwendig. Hierzu können die Rechenmodelle:

- Elastisch - isotroper Halbraum
- Mehrschichtentheorie
- Elastische Platte

oder auch andere Näherungsverfahren herangezogen werden. Im folgenden sollen diese Modelle kurz vorgestellt werden. Auf die umfangreiche Herleitung und Darstellung mathematischer Zusammenhänge wird verzichtet. Sie sind in der Fachliteratur BECKEDAHN und STRAUBE (1999), WIEHLER (1996), ULLIDTZ (1998) u.a. ausführlich beschrieben.

### Elastisch – isotroper Halbraum

Gleichungen für die Berechnung von Spannung, Dehnung und Verschiebung in einem homogenen, isotropen, linearelastischen Halbraum ausgehend von einer Punktlast senkrecht zur Oberfläche wurden 1885 von BOUSSINESQ entwickelt. Spannungen im Halbraum sind unabhängig vom E-Modul. Zur Theorie von BOUSSINESQ gehören auch Gleichungen zur Ermittlung der Verschiebungen an allen Punkten des Halbraumes. In Abbildung 2-2 ist die Halbraumtheorie nach BOUSSINESQ dargestellt.

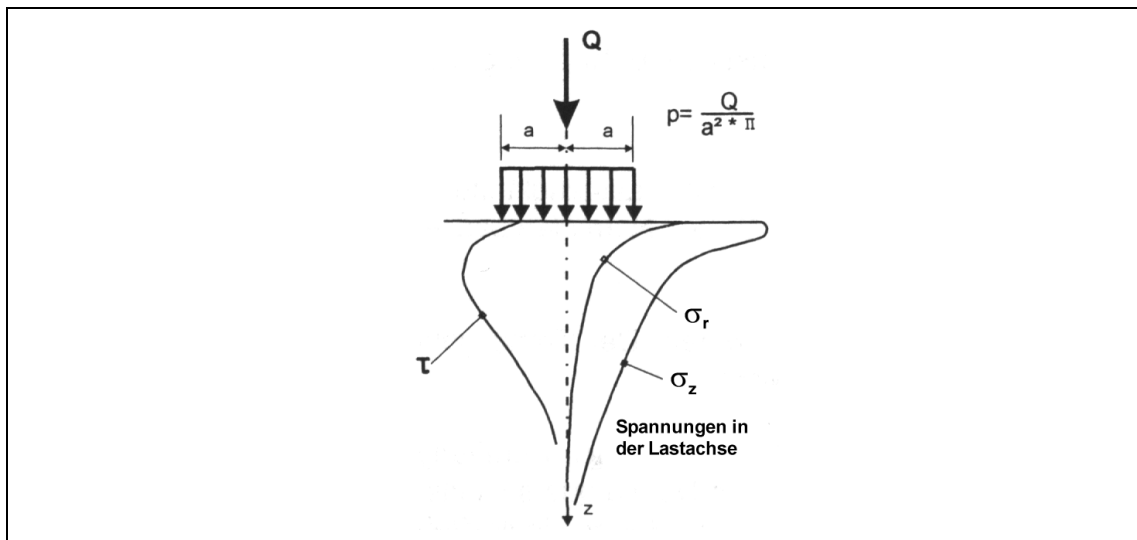


Abbildung 2-2: Halbraumtheorie nach BOUSSINESQ (HUTSCHENREUTHER und WÖRNER 1998)

Die Beanspruchung eines elastisch-isotropen Halbraumes durch eine beliebige andere senkrechte Belastung (streifenförmig, kreisförmig, rechteckig) mit konstanter oder veränderlicher Flächenpressung erhält man durch Integration.

### Mehrschichtentheorie

Bei einem mehrfach geschichteten System liegen eine oder mehrere elastische Schichten auf einem elastischen Halbraum. Jede Schicht  $i$  ist durch ihre Materialkonstanten, den Elastizitätsmodul  $E_i$  und die Querdehnzahl  $\mu$  gekennzeichnet. Die Mehrschichtentheorie setzt voraus, daß alle Schichten einer Straßenbefestigung homogen, isotrop, linearelastisch, masselos und seitlich unendlich ausgedehnt sind. Im System wird unterschieden zwischen fest miteinander verbundenen und reibungslos aufeinanderliegenden Schichten, die sich nicht voneinander abheben können (Abbildung 2-3).

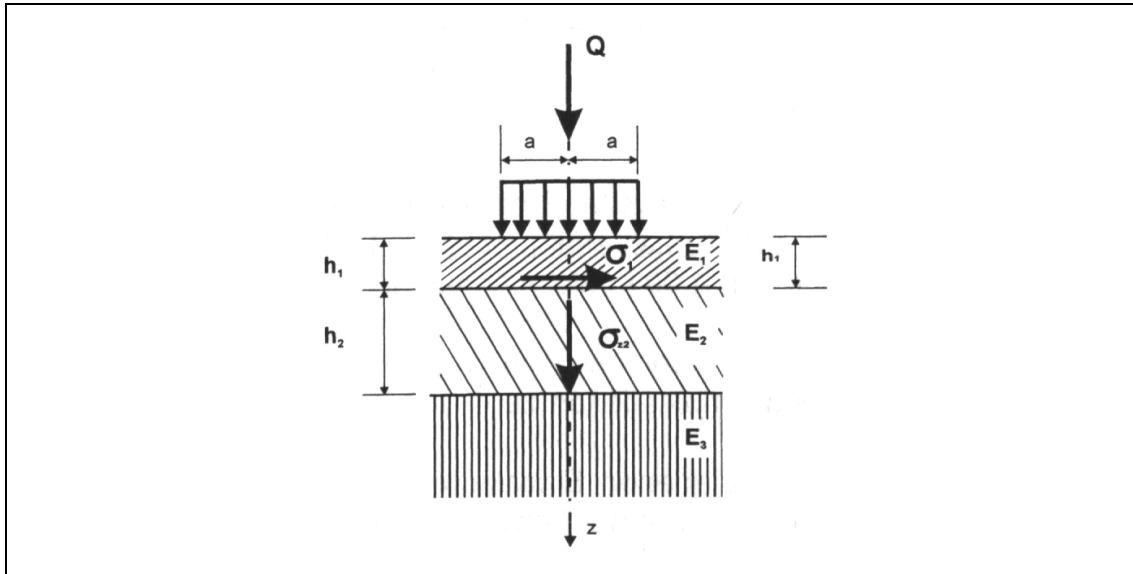


Abbildung 2-3: Mehrschichtentheorie nach BURMISTER (HUTSCHENREUTHER und WÖRNER 1998)

BURMISTER stellte 1945 Gleichungen zur Berechnung der Spannungen und Verschiebungen in einem Zweischichtensystem unter einer senkrechten, gleichmäßigen, kreisförmigen Belastung auf. Die senkrechten Spannungen sind bei fest miteinander verbundenen oder reibungslos aufeinanderliegenden Systemen an der Unterseite der einen Schicht und an der Oberseite der darunterliegenden Schicht gleich. Für die radialen Biegespannungen ergeben sich auf beiden Seiten der Schichtgrenze unterschiedliche Werte. Mit Hilfe der von BURMISTER entwickelten Gleichungen kann die Einsenkung im Lastangriffspunkt berechnet werden. Er stellte Kurven für Elastizitätsmodulverhältnisse  $E_2/E_1$  dar, die in Abhängigkeit des Verhältnisses Schichtdicke zu Belastungshalbmesser und Setzungsfaktor aufgetragen sind. Anhand dieser Darstellung kann der Setzungsfaktor abgelesen und für die weitere Berechnung der Einsenkung eingesetzt werden. Die ermittelte Einsenkung stellt ein Beurteilungskriterium für die Beanspruchung der Straßenkonstruktion dar. Die später von BURMISTER entwickelten Gleichungen für ein Dreischichtensystem stellten komplizierte Integrale dar und konnten erst mit Hilfe höherentwickelter Rechentechnik berechnet werden. Die Mehrschichtentheorie liefert für die Praxis meistens ausreichend genaue Ergebnisse und kommt in der theoretisch-rechnerischen Bemessung zum Tragen.

## **Elastische Platte**

Für Berechnungen am Rand und den Ecken einer starren Befestigung ist die Mehrschichtentheorie nicht anwendbar, da die Voraussetzung der seitlich unbegrenzten Ausdehnung nicht mehr gegeben ist. Der Physiker HERTZ untersuchte 1884 erstmals Spannungen und Einsenkungen einer auf einer Flüssigkeit schwimmenden, elastischen Platte infolge einer Einzellast. Aufbauend auf diesen Ergebnissen entwickelte WESTERGAARD 1926 Formeln für eine gleichmäßige, lotrechte, kreisförmige Belastung einer elastischen Platte aufgelagert auf einer nachgiebigen Unterlage. Anstelle des Raumgewichtes (Flüssigkeit) führte er die Bettungsziffer  $k$  ein, die die Nachgiebigkeit der Unterlage charakterisiert. Er untersuchte neben den Spannungen in der Plattenmitte auch Laststellungen am Rand und an der Ecke der Platte und gab für alle Lastfälle Gleichungen zur Berechnung der Spannungen an. Dabei ging er von der Annahme aus, daß die Einsenkungen unter der Platte proportional der Bodenpressung sind (Plattentheorie). Feldversuche zeigten jedoch Unterschiede zwischen theoretisch errechneten und praktisch ermittelten Werten. Deshalb wurden die theoretischen Formeln durch empirische Korrekturfaktoren verbessert (verbesserte Westergaardsche Formeln). Mit Hilfe der Arbeit von WESTERGAARD ist es möglich, Spannungen und Einsenkungen auch außerhalb der Lastachse zu berechnen.

## **Näherungsverfahren**

ODEMARK schaffte 1949 mit dem Ersatzhöhenverfahren die Möglichkeit, ein Zweischichtsystem in einen elastisch-isotropen Halbraum zu überführen und auftretende Verformungen und Spannungen in der Kraftachse zu berechnen. Dabei wird von der Theorie ausgegangen, daß bei Umrechnung der oberen Schicht in das Material der unteren Schicht bei gleicher Breite aber unterschiedlichen E-Moduli auch unterschiedliche Höhen notwendig sind, um die gleiche Steifigkeit zu erreichen. Die einzelnen Schichten werden dabei durch äquivalente Schichten gleicher Steifigkeit ersetzt. Auf diese Weise kann ein Mehrschichtensystem in einen äquivalenten Halbraum umgewandelt werden. Die Hauptspannung in jedem Punkt der Lastachse des äquivalenten Systems kann mit Hilfe der Formel zur Ermittlung der Spannungen im elastisch-isotropen Halbraum bestimmt werden. Die Einsenkungen an der Oberseite eines Zweischichtensystems hat ODEMARK unter Berücksichtigung der Einsenkung an der Oberseite der zweiten Schicht und der Zusammendrückung der ersten Schicht bestimmt. Die Einsenkung ist demnach gleich der Einsenkung, die eine direkt auf die zweite Schicht wirkende Belastung hervorruft, multipliziert mit einem Einsenkungsfaktor. Die ermittelten Einsenkungen wichen von denen nach BURMISTER ab. Deshalb führte ODEMARK einen Korrekturfaktor  $n$  ein.

EISENMANN hat 1966 ein Näherungsverfahren zur Ermittlung der Spannungen im Zwei- bzw. Dreischichtensystem unter kreisförmiger, gleichmäßig verteilter, vertikaler Belastung entwickelt. Die Radial- und die Vertikalspannungen werden an den Schichtgrenzen ermittelt. Für die Berechnung der Radialspannungen nach WESTERGAARD führte EISENMANN (1966) eine fiktive Bettungszahl  $k$  ein, die vom E-Modul der dritten Schicht (Halbraum) und den geometrischen Größen des Systems abhängig ist.

HANK und SCRIVNER erstellen Diagramme zur Bestimmung der radialen Biegespannung und der vertikalen Druckspannung an der Unterseite der oberen Schicht in der Lastachse eines Zweischichtensystems. Für eine kreisförmig verteilte Einzellast und für definierte E-Modul-Verhältnisse kann die Beschaffenheit der Schichtgrenze für die Zustände „voller Verbund“ und „kein Verbund“ bei der Spannungsermittlung berücksichtigt werden. Zwischenverbundzustände können nicht berücksichtigt werden.

## **2.4 Rechenprogramme zur Voraussage des Verhaltens des Oberbaus unter Berücksichtigung des Schichtenverbundes**

Zur Voraussage des Verhaltens des Oberbaus bei Belastung wurden in den letzten Jahrzehnten mehrere mechanische Modelle entwickelt. Computergestützte Modellsysteme verwenden für flexible Oberbauten entweder die lineare, viskoelastische oder elastische Mehrschichtentheorie. Für starre Oberbauten wird die Plattentheorie angewandt. In diesen Modellen wird der zeitliche Verlauf von Spannungen, Dehnungen oder Einsenkungen an einem beliebigen Punkt des Oberbaus ermittelt, der auf das einmalige Einwirken einer aufgetragenen Belastung zurückzuführen ist.

Rechenprogramme, basierend auf den theoretischen Berechnungsverfahren, werden für die Dimensionierung und Herstellung von Asphaltstraßen genutzt. Gleichzeitig können durch die Berechnung von Spannungen und Verformungen bei auftretender Belastung Prognosen zur Ermüdung von Asphaltstraßen erstellt werden. Das Auftreten erster Schäden wird vorhergesagt, und es werden Aussagen zur Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen getroffen. Hinsichtlich des Kriteriums Schichtenverbund wird davon ausgegangen, daß zwischen allen Schichten ein ausreichend kraftschlüssiger Verbund besteht, um alle Schichten zur Lastabtragung nutzen zu können.

Das BISAR-Programm der Shell AG beruht auf der Theorie von BURMISTER. Es können in jedem beliebigen Punkt die Spannungen und Verformungen in einem bis zu zehn Schichten unterteilten Mehrschichtensystem berechnet werden. Als Eingabegrößen für die Beanspruchungsberechnung werden die Anzahl der Schichten, E-Modul, Quer-



dehnzahl und Dicke je Schicht, Radius der Reifenaufstandfläche und die Kontaktpres-  
sung benötigt. Da in Mehrschichtensystemen nur statisch wirkende Lasten berücksich-  
tigt werden können, muß für Asphaltkonstruktionen die Abhängigkeit der Beanspru-  
chungsreaktion von der Dauer der Lasteinwirkung und der Temperatur hinzugenom-  
men werden. Dies geschieht durch die versuchstechnische oder auf Rechenmodellen  
basierende Ermittlung des frequenz- und temperaturabhängigen Elastizitätsmoduls des  
Asphaltes. Das System ist auf der Straßenoberfläche von einem oder mehreren ein-  
heitlichen runden Lasten belastet, mit einer einheitlichen Lastverteilung über dem be-  
lasteten Bereich. Das BISAR Programm bietet die Möglichkeit, den Schichtenverbund  
zwischen den Asphaltsschichten zu variieren. Dabei sind die Zustände „voller Verbund“  
und „kein Verbund“ aus praktischer Sicht genau definiert. Das Gleiten zwischen den  
Schichten berücksichtigt BISAR über die sogenannte “Shear Spring Compliance” (AK-  
Wert), der sich über die Verbundstärke zwischen den einzelnen Schichten definiert. Die  
genaue Definition der Zwischenstufen ist schwierig. METELMANN und BEECKEN (1979)  
zeigen anhand von Berechnungen mit dem BISAR Programm Schäden infolge fehlen-  
den Schichtenverbundes auf. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Kapitel 3  
ausführlich beschrieben.

Später wurde die Finite Element Methode (FEM) entwickelt, mit der auch das Verhalten  
von nicht linearen und plastischen Werkstoffen und spezielle Gegebenheiten wie Fahr-  
bahnfugen, Mängeln im Oberbau und Aufbiegen der Fahrbahnplatten berücksichtigt  
werden können. Mit Hilfe der Finiten Element Methode können räumliche Tragwerke in  
Einzelelemente mit bestimmten Abmessungen und Materialeigenschaften unterteilt  
werden. Diese Einzelelemente werden an definierten Knotenpunkten verbunden. Die  
Systemform und Art der Belastung ist beliebig definierbar. Durch die steigende Sys-  
temgliederung kann eine größere Annäherung an das tatsächliche Tragverhalten er-  
zielt werden (ULLIDTZ, 1998). Verbundstörungen können bei Berechnung nach der Fini-  
ten Element Methode sowohl durch Anordnung von dreidimensional wirkenden Feder-  
elementen zwischen den Knotenpunkten zweier identischer Ebenen (Schichtgrenzen)  
als auch durch die Koppelung identischer Knotenpunkte simuliert werden. Ein großer  
Vorteil der Finiten Element Methode gegenüber dem BISAR-Programm besteht darin,  
daß der Verbund flächenbezogen unterschiedlich definiert werden kann. Die Rißbil-  
dung als Folge mangelhaften Schichtenverbundes untersucht WEBER (1991) mit der  
Finiten Element Methode. Auch diese Untersuchungen sind in Kapitel 3 ausführlich  
dargestellt.

Neuste Rechenmodelle ermöglichen die Erfassung der Beanspruchung von Fahrbahn-  
befestigungen infolge der tatsächlichen, dynamischen Verkehrsbelastung. Ein Beispiel

dafür zeigen SIDDHARTHAN, YAO und SEBAALY (1998) in ihrem Fachaufsatz zur Berechnung der Dehnung im Straßenaufbau bei bewegter dynamischer 3D-Belastung. Mit Hilfe eines Annäherungsverfahrens wird bei begrenzter Schichtenausdehnung innerhalb eines Kontinuums die Auswirkung einer bewegten Last erfaßt. Dabei hat sich gezeigt, daß die Verkehrslasten eine uneinheitliche Spannungsverteilung unter dem Reifen bewirken. Das Modell ermöglicht, den Einfluß der Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Zugdehnung der Asphaltunterseite zu identifizieren. Einflüsse aus Ebenheit, dem Aufhängesystem des Lastwagens und der Fahrgeschwindigkeit können abgeschätzt werden. Untersuchungen zum Einfluß des Schichtenverbundes auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltbefestigungen mit Hilfe dieser Programme sind bisher nicht bekannt.

## **2.5 Spannungsverlauf in Fahrbahnbefestigungen in Abhängigkeit von der Größe des Schichtenverbundes – BISAR Berechnungen**

Das auf der Elastizitätstheorie beruhende Rechnerprogramm BISAR ermöglicht die Bestimmung von Spannungen, Dehnungen und Verformungen an beliebigen Punkten einer schichtenweise aufgebauten Fahrbahnbefestigung. Der Schichtenverbund wird durch die Relativverschiebung der beiden Schichten und die übertragene Schubspannung charakterisiert. Das Programm bietet die Möglichkeit, zwischen „vollem Verbund“ und „fehlendem Verbund“ sowie Zwischenstufen zu unterscheiden. Die folgenden Untersuchungen zeigen den Spannungsverlauf in Fahrbahnbefestigungen in Abhängigkeit von der Größe des Schichtenverbundes.

Das Gleiten zwischen den Schichten wird durch die “Shear Spring Compliance”, im folgenden AK-Wert genannt, berücksichtigt, der wie folgt definiert ist:

$$AK = \frac{\text{relative horizontale Verschiebung der Schichten}}{\text{wirkende Drücke in der Schichtgrenze}} \quad [\text{m}^3/\text{N}]$$

Dieses Verhältnis wird mathematisch durch den Parameter  $\alpha$  wiedergegeben, der folgendermaßen definiert ist:

$$\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1+\nu}{E} \cdot a}$$

$a$  = Radius der Belastung [m]

$E$  = E-Modul der Schicht über der Schichtgrenze [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

$\nu$  = Poisson-Zahl dieser Schicht [-]

$\alpha$  = Reibungskoeffizient [-]

Verbund-Parameter mit  $0 \leq \alpha \leq 1$

$\alpha = 0$  bedeutet voller Verbund zwischen den Schichten

$\alpha = 1$  bedeutet kein Verbund, völlige Reibungsfreiheit an den Schichtgrenzen

Eine reduzierte "Shear Spring Compliance", im folgenden ALK-Wert genannt, ist definiert als:

$$ALK = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot a \text{ [m]}.$$

Sie beschreibt das verminderte Einhalten des Schichtenverbundes. Zur Herleitung des AK-Wertes sind folgende Gleichungen bekannt:

$$AK = ALK \cdot \frac{1 + \mu}{E} \quad [\text{m}^3/\text{N}]$$

$$AK = \frac{u_{x2} - u_{x1}}{\tau} \quad [\text{m}^3/\text{N}]$$

- $\mu$  - Querdehnzahl
- $\tau$  - Schubspannung
- $u_{x1}$  - Verschiebung der Deckschicht in x-Richtung
- $u_{x2}$  - Verschiebung der Binderschicht in x-Richtung

Um einen Zusammenhang zwischen Relativverschiebung und Schichtenverbund herstellen zu können, wurde folgender mathematischer Zusammenhang aufgestellt:

- Der Schichtenverbund beträgt 100 % bei  $AK = 0$  (voller Verbund zwischen den Schichten)
- Der Schichtenverbund beträgt 0 % bei  $AK = \infty$  (kein Verbund zwischen den Schichten)

Die Relativverschiebung ( $\Delta u$ ) in der Schichtgrenze lässt sich durch die Beziehung

$$\Delta u = u_{x2} - u_{x1}$$

ausdrücken. Hieraus ergeben sich die Bedingungen:

- Der Schichtenverbund beträgt 100 %, wenn  $u_{x2} - u_{x1} = 0$
- Der Schichtenverbund beträgt 0 %, wenn  $u_{x2} - u_{x1} = \infty$

Demnach liegt vollständiger Schichtenverbund (SV) vor, wenn  $u_{x2} = u_{x1}$  ist, d.h. keine Relativverschiebung auftritt.

Daraus folgt:

$$u_{x1} = \frac{SV}{100} \cdot u_{x2} \quad \text{oder}$$

$$SV = \frac{100 \cdot u_{x1}}{u_{x2}}.$$

Abbildung 2-4 zeigt den Zusammenhang zwischen Schichtenverbund, Relativverschiebung und ALK-Werten am Beispiel eines Aufbaues gemäß Bauklasse SV. In Anlage 1.1 sind das Berechnungsmodell sowie die erforderlichen Eingabegrößen für die BISAR Berechnungen aufgeführt. Die ALK-Werte sind frei gewählt. Mit Hilfe des BISAR-Programmes werden die Verschiebungen der Deckschicht ( $u_{x1}$ ) und der Binderschicht ( $u_{x2}$ ) in x-Richtung berechnet und stellen die Eingangsgrößen für die obige Gleichung dar.

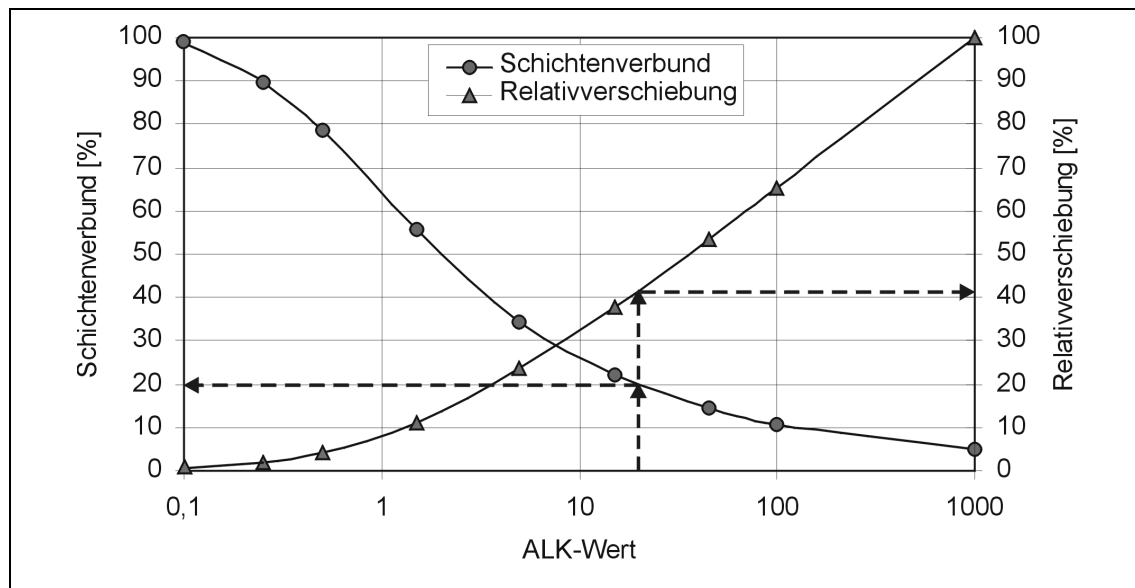


Abbildung 2-4: Zusammenhang zwischen Schichtenverbund, Relativverschiebung und ALK - Werten

Mit zunehmendem ALK-Wert nimmt der Schichtenverbund ab und die Relativverschiebung zu. Der größte Abfall des Schichtenverbundes von 100 % auf 20 % ist bei einem ALK-Wert von 17 zu verzeichnen (Abbildung 2-4). Die Relativverschiebung beträgt hier 40 %.

Abbildung 2-5 zeigt die Verschiebung infolge der Lasteinwirkung an der Oberfläche der Asphaltdeckschicht bei einem Schichtenverbund von 100 %, 55 % und 10 %. Mit abnehmendem Schichtenverbund ist eine Zunahme der Verschiebungen in Richtung der y-Achse zu beobachten.

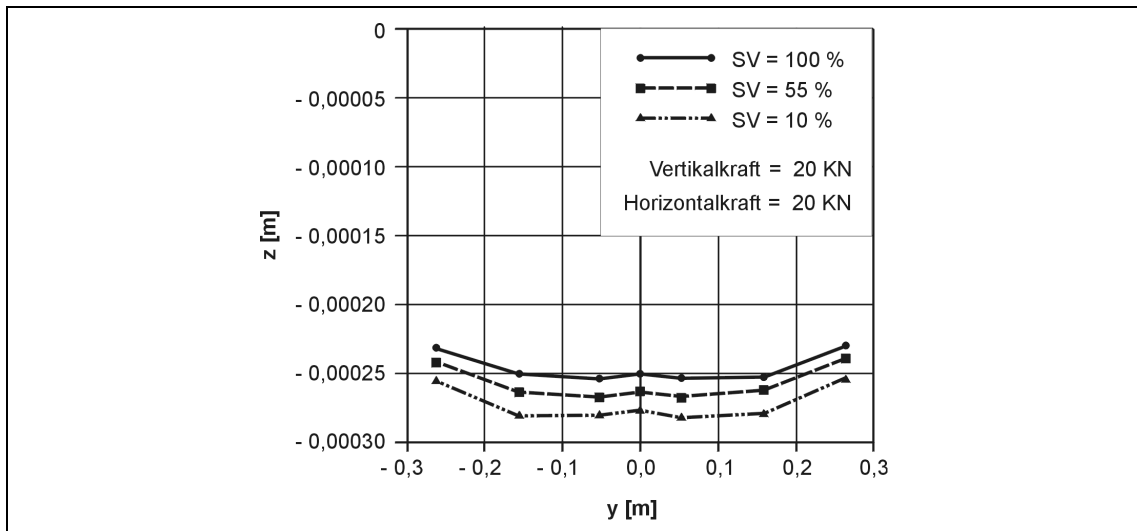


Abbildung 2-5: Verschiebung an der Oberfläche der Fahrbahnbefestigung bei variiertem Schichtenverbund

Die Hauptspannungen können gemäß HOU (1996) auf der Oktaederfläche in eine Normal- und Schubspannung zerlegt werden. Der Zusammenhang zwischen den auf der Oktaederfläche wirkenden Spannungen  $\sigma_8$  und  $\tau_8$  und den Hauptspannungen ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

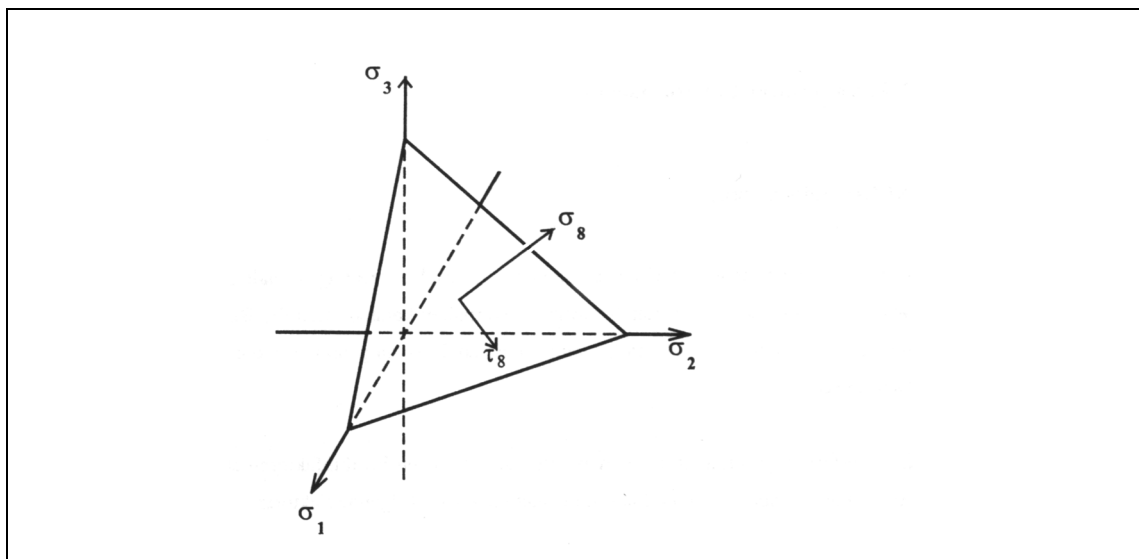


Abbildung 2-6: Spannungen  $\sigma_8$  und  $\tau_8$  auf der Oktaederfläche

Auf der Oktaederfläche können

- einerseits im Gegensatz zu der Coulomb-Mohr'schen Bruchbedingung alle Spannungskomponenten als gleichwertig betrachtet und
- andererseits im Gegensatz zu der dreidimensionalen Darstellungsweise des Spannungs-Verformungs-Zustandes die Einflüsse der inneren Reibung des Haufwerkes auf die Verformung analysiert werden.

Um derartige Spannungsumlagerungen in der Asphaltbefestigung zu veranschaulichen, wird nachfolgend exemplarisch der Verlauf der Oktaederspannungen bei konstantem Verbund zwischen Binder- und Tragschicht und abnehmendem Verbund zwischen Deck- und Binderschicht für eine Baumaßnahme der Bauklasse SV (Anlage 1.1) dargestellt.

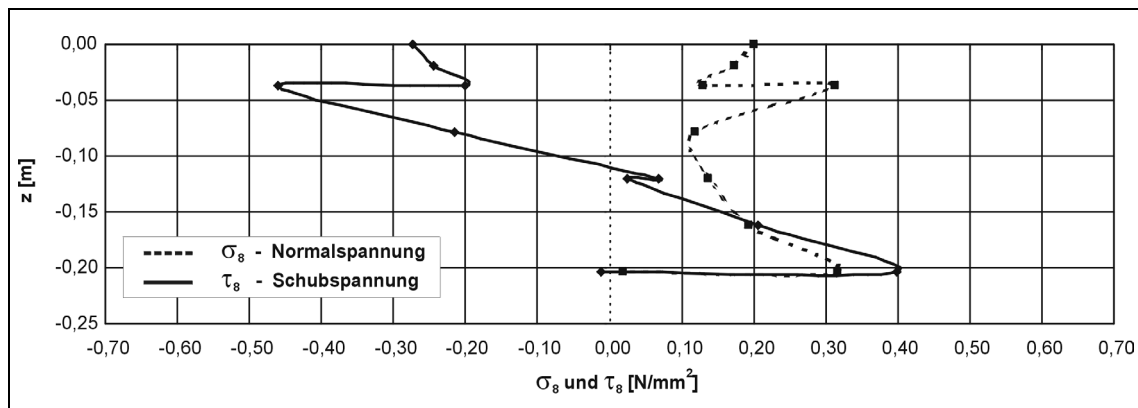


Abbildung 2-7: Verlauf Oktaederspannungen bei vollem Verbund zwischen allen Schichten

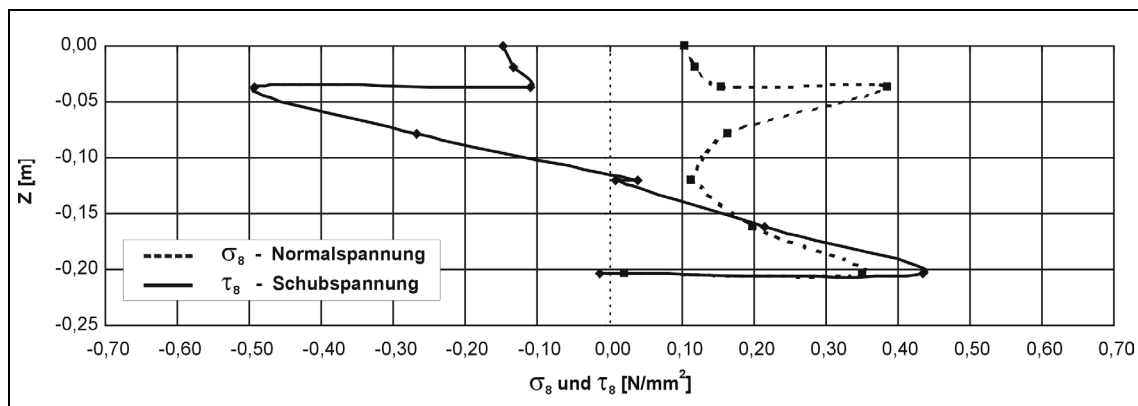


Abbildung 2-8: Verlauf Oktaederspannungen bei ca. 50% Schichtenverbund zwischen ADS-ABI

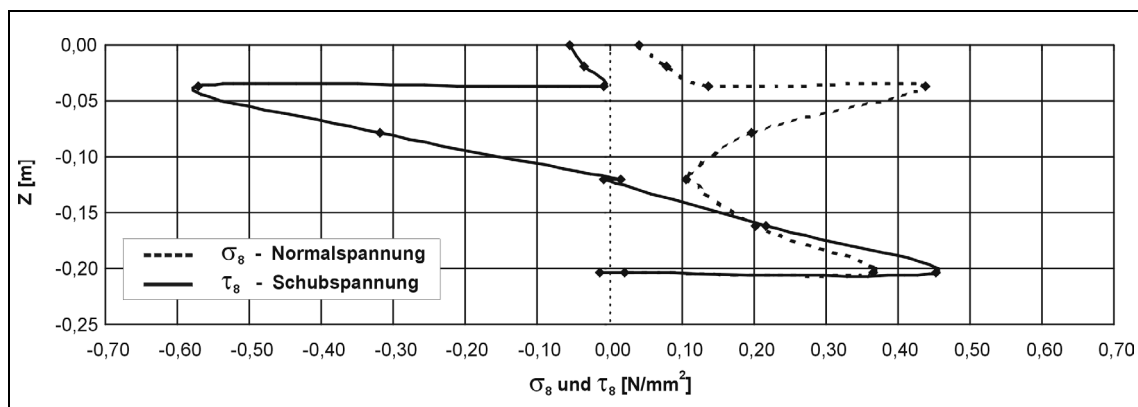


Abbildung 2-9: Verlauf Oktarderspannungen bei ca. 20% Schichtenverbund zwischen ADS-ABI

Die Abbildungen 2-7 bis 2-9 verdeutlichen, daß bei geringer werdendem Verbund in der Schichtgrenze Deckschicht – Binderschicht eine Spannungsumlagerung bzw. –erhöhung eintritt. Die Schubspannung ( $\tau_8$ ) fällt in der Schichtgrenze, die Normalspannung ( $\sigma_8$ ) steigt. In den Schichtgrenzen Binderschicht – Tragschicht und Tragschicht – Frostschutzschicht bleiben die Spannungen annähernd gleich. Dies weist auf die zunehmende Gefahr der Spurrinnen- und Rißbildung bei abnehmendem Schichtenverbund hin. Untersuchungen mit abnehmendem Verbund zwischen Binderschicht und Tragschicht zeigten eine Verstärkung dieses Effektes.

### **3 Stand der Wissenschaft und Technik**

#### **3.1 Einflüsse auf den Schichtenverbund**

Der Verbund von Asphaltsschichten besteht aus Verzahnung und Verklebung. Die Verzahnung wird von der Rauheit und Temperatur der Unterlage, der Mischgutzusammensetzung der Asphaltsschichten, der Einbautechnik und der Temperatur des Mischgutes beeinflusst. Eine gute Verzahnung zeichnet sich dadurch aus, daß die Splittkörner der oberen Schicht in den beim Einbau erwärmten Mörtel der Unterlage eindringen.

Die Verklebung wird durch verschiedene Faktoren begünstigt. Im Einzelnen wirkt sich hierbei die Verwendung von Asphaltmischgut mit einem klebefähigen Bindemittelfilm, das gleichmäßige Ansprühen der Unterlage mit einem bitumenhaltigen Bindemittel und das Zusammenpressen der Unterlage mit dem Mischgut während des Einbaus und der Walzverdichtung günstig auf die Verklebung aus. Weiterhin muß gewährleistet sein, daß keine Fremdstoffe wie Schmutz, Wasser oder Reste von Trennmitteln das Verkleben verhindern. Eine ausreichend hohe Einbautemperatur wirkt sich positiv auf den Verklebungseffekt aus, da der Bindemittelfilm der Unterlage mit dem des neuen Mischgutes verschmelzen kann.

Eine Grundlage zur Erzielung eines guten Schichtenverbundes ist die Eignung der Unterlage, die optisch beurteilt werden kann. Das „Merkblatt für Schichtenverbund, Nähte, Anschlüsse und Randausbildungen von Verkehrsflächen aus Asphalt (M SNAR)“ (FGSV 1998) nennt hierzu die wichtigsten Merkmale und sieht weitere Maßnahmen zur Reinigung, zur Ausbesserung oder zum Ansprühen der Unterlage vor. Als Merkmale werden die Gleichmäßigkeit der Oberfläche, die Rauheit und Porosität, trennende Stoffe, gefräste Oberflächen sowie Markierungen genannt. Zum Ansprühen der Oberflächen werden je nach Bauklasse und Zustand der Unterlage lösemittelfreie Bitumenemulsionen (U 60 K), lösemittelhaltige Bitumenemulsionen (Haftkleber) oder polymermodifizierte Bitumenemulsionen (PmOB Art C U 60 K) verwendet. Das Merk-

blatt enthält Angaben zur Auswahl und Dosierung der Bindemittelemulsionen. In der ZTV Asphalt-StB 94/98 sowie in der ZTVT-StB 95 werden lediglich Richtwerte für die Verwendung von Bitumenemulsionen empfohlen, falls das Ansprühen der Unterlage zum Verbund der Schichten erforderlich ist.

Im Jahre 1976 stellt HOLL fest, daß ein idealer Schichtenverbund nur dann vorhanden ist, wenn in den Schichtgrenzen keine Inhomogenitäten auftreten. Weiterhin zeigt er auf, daß mit einem dünnen und vollflächigen Bindemittelfilm mit geeigneter Konsistenz ein hoher Verschiebungswiderstand erreicht werden kann. Für HOLL läßt sich ein annähernd idealer Verbund am besten mit gleichen Mischgutsorten in einer „heiß auf heiß“ Kombination erzielen, da die Bitumenfilme die gleiche Dicke aufweisen und somit unmittelbar miteinander verschmelzen. Das gleiche Ergebnis kann auch für verschiedene Mischgutsorten in einer „heiß auf kalt“ Kombination erreicht werden, sofern der Einbau „frisch auf frisch“ erfolgt. Bei allen „frisch auf alt“ Kombinationen reicht jedoch der Bitumenfilm der alten Unterlage nicht aus, so daß die Unterlage zusätzlich mit Bindemittel angespritzt werden muß.

STOSCH (1978) beschreibt verschiedene Arten und Verwendungsmöglichkeiten von Vorspritzmitteln. Er stellt dar, daß ein guter Schichtenverbund durch Verzahnung und/oder Verklebung erzielt werden kann, wenn die Anspritzmittel richtig eingesetzt werden. Die optimale Bindemittelmenge ergibt sich in Abhängigkeit der vorhandenen Schicht und der später aufzubringenden Schicht.

GRAGGER (1981) berichtet über Untersuchungen, die zeigen, daß die Gleitschäden auf mangelnde Scherfestigkeiten in einer Ebene oder in der Nähe der Grenzflächen zwischen Deck- und Binderschicht zurückzuführen sind. Unter sommerlicher Temperatureinwirkung könnten beim Bau entstandene Gleitebenen wieder verklebt werden.

GRÄTZ und SUß (1983) führen eine Analyse von Scherversuchen zur Klärung eines Schadenfalles durch. Die Prüfung des Schichtenverbundes erfolgt an Bohrkernen zwischen Deck- und Binderschicht. Sie beschreiben die ermittelten Kraft-Weg Diagramme und heben hervor, daß der Widerstand gegen das Abscheren in der Schichtgrenze von der Oberfläche der Mineralstoffkörner, dem Verzahnungswiderstand der Körner, der Adhäsion zwischen Bindemittel und Mineralstoffkorn sowie der Kohäsion des Bindemittels beeinflusst wird. Zusammenfassend wird dargestellt, daß der Zustand der Grenzfläche die Größe der aufnehmbaren Schubspannung sowie die Schadensbildung beeinflusst.

GLET und KNORR (1987) formulieren für den Einbau dünner Schichten im Kalteinbau Gründe für einen schlechten Schichtenverbund. Sie machen für einen mangelhaften



Verbund die Alterung des Bitumens der Asphaltunterlage, eine verschmutzte Oberfläche und ein zu schnelles Brechen der Emulsion verantwortlich. Bei einer verschmutzten Unterlage wird der Einsatz eines Haftklebers mit einer maximalen Menge von 150 g/m<sup>2</sup> empfohlen.

VELSKE (1987) berichtet über Untersuchungen von Schichtgrenzen an Asphaltprobestkörpern. Er simuliert im Labor verschiedene Einbaubedingungen und zeigt auf, daß der beste Verbund mit der „frisch auf frisch“ Kombination erzielt wird, wenn die untere Schicht eine unbeschädigte Umhüllung der Mineralstoffe mit steifem, füllerhaltigem Bitumen gewährleistet. Wenn diese Bedingungen nicht vorliegen, empfiehlt VELSKE die Anwendung eines Vorspritzmittels. Er ist der Ansicht, daß die Anwendung von Haftkleber dem Gebrauch von unstabilen Bitumenemulsionen vorzuziehen sei. Bei kalter Witterung kann ein ausreichender Schichtenverbund nur unter Verwendung eines sehr heißen Mischgutes erreicht werden.

HIERSCHE u.a. (1988) berichten nach Abscherversuchen mit dem Scherversuch nach LEUTNER (1979), daß Schichten aus feinkörnigem Material höhere Scherkräfte als Schichten aus grobkörnigem Material liefern. Weiterhin konnten als den Schichtenverbund beeinflussende Faktoren die Rauhtiefe, Haftklebermenge und der Ausfüllungsgrad nachgewiesen werden. Den besten Schichtenverbund erzielt die „frisch auf frisch“ Kombination. Falls diese Einbauart nicht durchgeführt werden kann, sollen nach HIERSCHE u.a. Vorspritzmittel mit Mengen von 100 bis 300 g/m<sup>2</sup> eingesetzt werden.

Nach der Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER ermittelt PÖS (1991) Faktoren, die den Schichtenverbund sowohl in der Kombination „frisch auf frisch“ als auch in der Kombination „frisch auf alt“ beeinflussen. In dem Fall „obere frisch eingebaute Schicht auf unterer frischer Schicht“ zeigt er auf, daß die Scherkraft und der Scherweg größer sind, je geringer der Hohlraumgehalt der oberen Schicht ist. Zudem erhöht sich die Scherkraft mit steigendem Bindemittelgehalt der unteren Schicht, und bei zunehmendem Bindemittelgehalt der oberen Schicht steigt die Größe des Scherweges. In dem Fall „obere frisch eingebaute Schicht auf unterer älterer Schicht“ steigen die Scherkraft und der Scherweg mit abnehmendem Hohlraumgehalt der oberen Schicht. Weiterhin liegen auch höhere Scherkräfte und Scherwege vor, je größer der Bindemittelgehalt der oben liegenden Schicht ist. Höhere Scherkräfte werden durch feinkörnig zusammengesetzte obere Lagen auf grobkörnigen unteren Lagen begünstigt. PÖS unterstreicht, daß die Kombination „frisch auf frisch“ für den Schichtenverbund der günstigere Fall ist.

Zusammenfassend werden in der Abbildung 3-1 die wichtigsten Einflüsse auf den Schichtenverbund dargestellt.

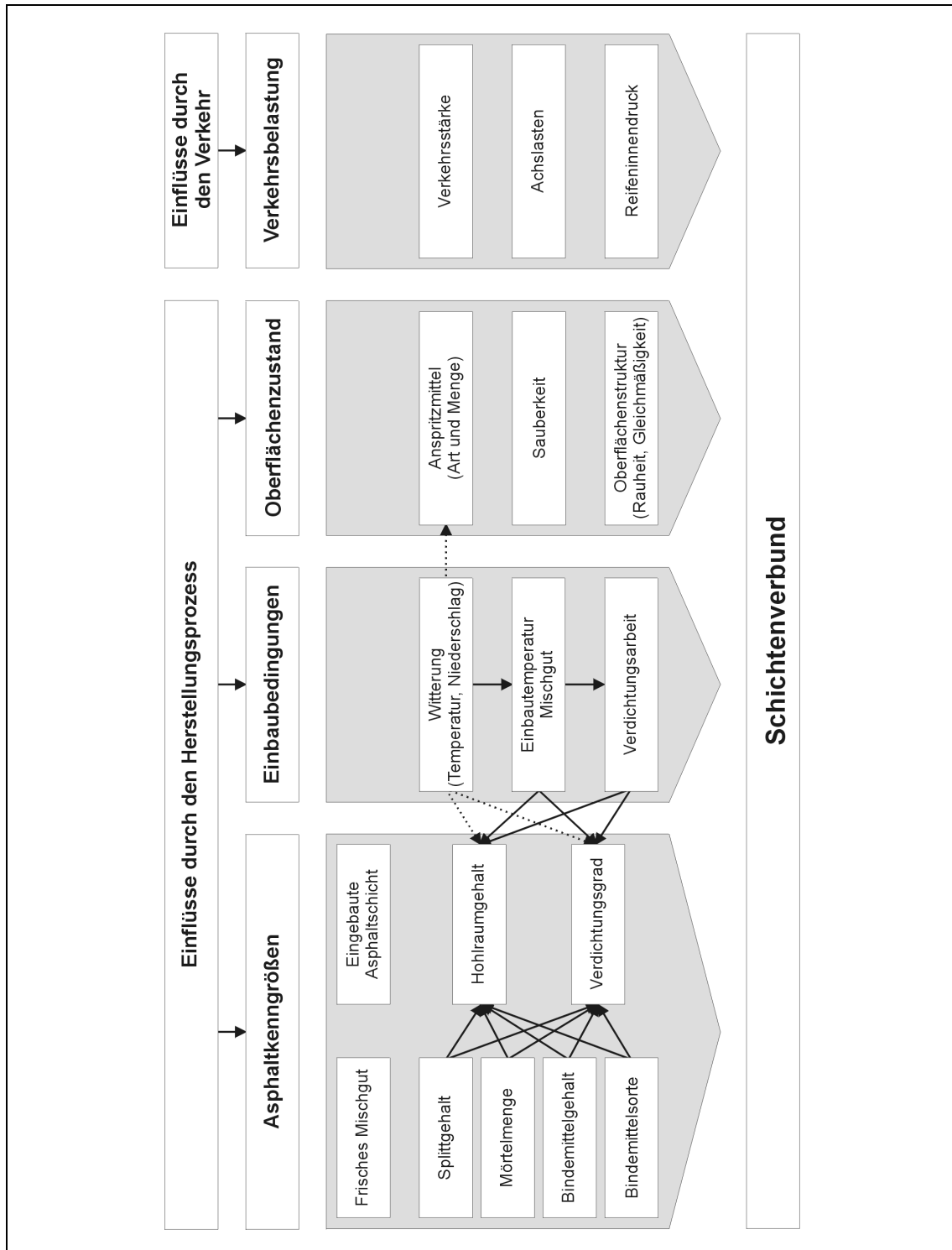


Abbildung 3-1: Einflüsse auf den Schichtenverbund

Sie sind in die vier Gruppen Asphaltkenngrößen (Bindemittelgehalt, Hohlraumgehalt etc.), Einbaubedingungen, Oberflächenzustand der zu überbauenden Schicht und Verkehrsbelastung unterteilt. Die Abbildung verdeutlicht die Vielfalt der Einflußfaktoren auf den Schichtenverbund, wobei die drei Erstgenannten Gruppen den Verbund zwischen

den Asphaltsschichten infolge des Herstellungsprozesses bestimmen. Die Verkehrsbelastung hat einen Einfluß auf die zeitliche Entwicklung des Schichtenverbundes.

### 3.2 Auswirkungen von Verbundstörungen

Nach GLET (1999) können Störungen des Schichtenverbundes durch lose liegende Schichten (kein Verbund), schiebende Schichten (weicher Verbund), nicht standfeste Schichten (zu dicker Verbundfilm) oder durch nur punktförmig sich berührende Schichten (zu wenig Mörtel) eintreten.

METELMANN und BEECKEN (1979) zeigen, daß Vertikalkräfte (Achslasten) und Horizontalkräfte (Schubkräfte) bei fehlendem Schichtenverbund Schäden verursachen. Mit Hilfe des BISAR-Programms der Firma Shell werden verschiedene Asphaltbefestigungen unter Betrachtung der Vertikalkräfte untersucht. Bei vollem Verbund setzen die Autoren eine relative Lebensdauer von 100 % fest. Diese Lebensdauer reduziert sich auf bis zu 30 % bei fehlendem Schichtenverbund in der oberen Schichtgrenze und auf 2 bis 7 % bei fehlendem Verbund in beiden Schichtgrenzen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

Lastwechselzahlen N		Baukl. I Zeile 1	Baukl. III Zeile 1	Baukl. I Zeile 3	Baukl. III Zeile 3
Beide Fugen verklebt	Asphalt	$3,0 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^5$
	Untergrund	$> 10^8$	$> 10^8$	$> 10^8$	$2,2 \cdot 10^7$
Obere Fuge ohne Ver- klebung	Asphalt	$9,0 \cdot 10^6$	$9,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^4$
	Untergrund	$> 10^8$	$6,0 \cdot 10^7$	$7,0 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^6$
Untere Fuge ohne Ver- klebung	Asphalt	$1,8 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^4$
	Untergrund	$8,0 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^6$
Beide Fugen ohne Ver- klebung	Asphalt	$1,0 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^4$
	Untergrund	$5,0 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$7,0 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$

Relative Lebensdauer		Baukl. I Zeile 1	Baukl. III Zeile 1	Baukl. I Zeile 3	Baukl. III Zeile 3
Beide Fugen verklebt	Asphalt	100 %	100 %	100 %	100 %
	Untergrund	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)
Obere Fuge ohne Ver- klebung	Asphalt	30 %	30 %	20 %	13 %
	Untergrund	(100 %)	( 60 %)	( 70 %)	( 23 %)
Untere Fuge ohne Ver- klebung	Asphalt	6 %	13 %	4 %	12 %
	Untergrund	( 80 %)	( 22 %)	( 15 %)	( 13 %)
Beide Fugen ohne Ver- klebung	Asphalt	3 %	7 %	2 %	5 %
	Untergrund	( 50 %)	( 17 %)	( 7 %)	( 5 %)

Beanspruchung Oberbau Bauklasse I  
Zeile 1 Rsto mit Belastung Einzelrad 5t

Schichten- verbund	Aufbau	Last- wechsel- zahlen	[%]
Beide Trenn- fugen zwischen den Schichten verklebt		$3,0 \cdot 10^7$	100
obere Trenn- fuge ohne Verklebung		$0,9 \cdot 10^7$	30
untere Trenn- fuge ohne Verklebung		$0,18 \cdot 10^7$	6
beide Trenn- fugen ohne Verklebung		$0,1 \cdot 10^7$	3

Abbildung 3-2: Reduzierung der Lebensdauer von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit vom Schichtenverbund (METELMANN / BEECKEN 1979)

Im FGSV-Arbeitspapier „Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen“ (1990) ist der Einfluß eines fehlenden Schichtenverbundes zwischen einzelnen oder mehreren Asphaltsschichten anhand folgender Abbildung dargestellt. Die Biegezugspannungen an

der Unterseite einer Asphalttragschicht nehmen in Abhängigkeit vom „fehlenden“ Verbund zu.

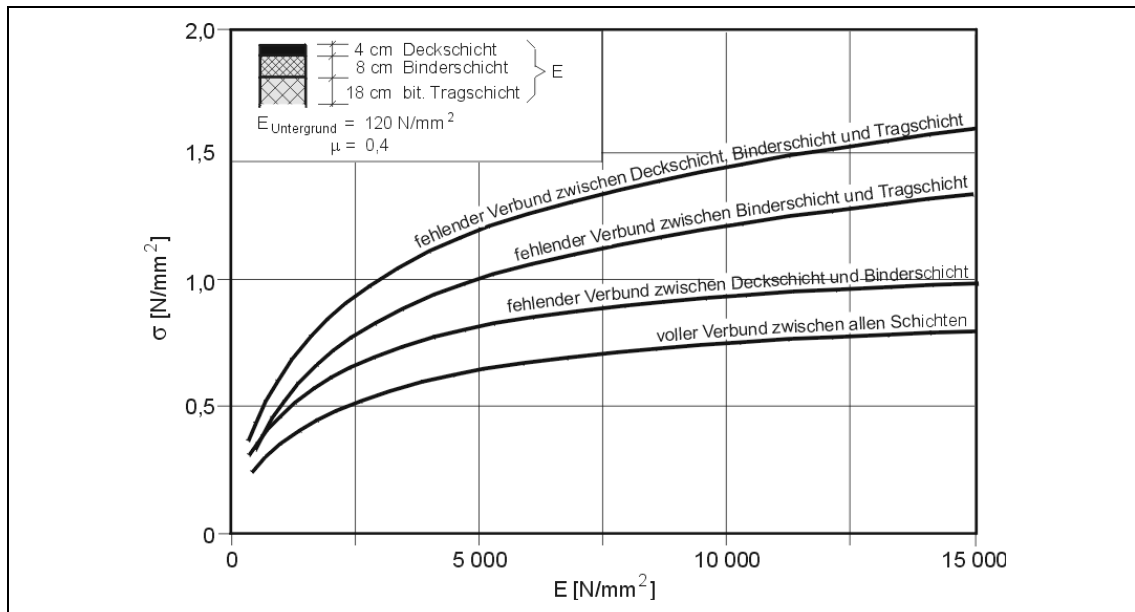


Abbildung 3-3: Biegezugspannungen an der Unterseite der Asphalttragschicht für ein 50 kN-Einzelrad (FGSV-Arbeitspapier 25/ B 5.1, 1990)

Die Abnahme der Nutzungsdauer infolge der Biegezugbeanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

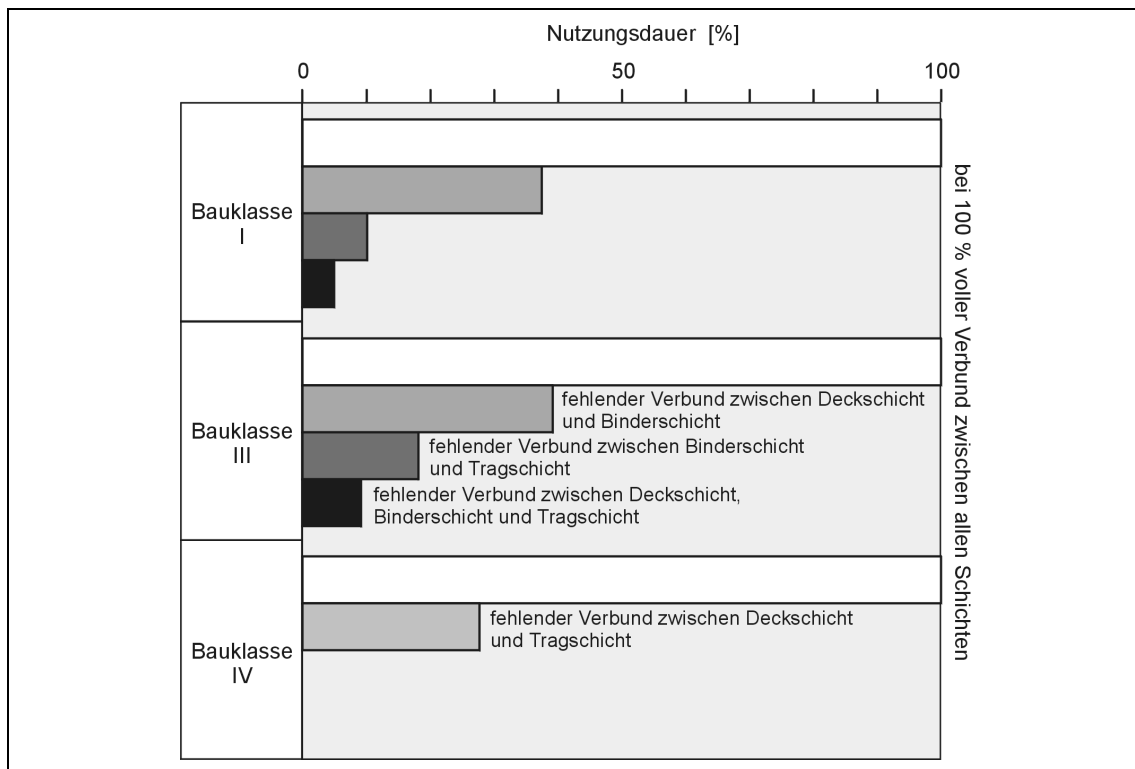


Abbildung 3-4: Abnahme der Nutzungsdauer infolge Biegebeanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht (Lastachse) (FGSV-Arbeitspapier 25/ B 5.1 1990)

Durch die Lösung des Verbundes zwischen Deck- und Binderschicht werden gemäß Arbeitspapier die Beanspruchungen an der Unterseite der Asphalttragschicht erhöht, so daß mit einer Reduzierung der Nutzungsdauer der Befestigung auf 30 bis 40 % des Wertes bei vollem Verbund zu rechnen ist.

SCHULZE (1979) zeigt anhand von Beispielen, daß ein unzureichender Schichtenverbund trotz optimaler Mischgutzusammensetzung zu Unebenheiten und zur Spurrinnenbildung führen kann.

EISENMANN (1984) erläutert anhand zahlreicher Beispiele die Bedeutung des Schichtenverbundes für ein gutes Langzeitverhalten. Die Biegebeanspruchungen der einzelnen Schichten steigen bei fehlendem Verbund erheblich. Die Zunahme der radialen Zugspannungen durch fehlenden Verbund führt zu einer erhöhten Beanspruchung der Asphaltbefestigung und schließlich zur Rißbildung. Abbildung 3-5 zeigt die Auswirkungen eines fehlenden Schichtenverbundes an einem Beispiel der Bauklasse III.

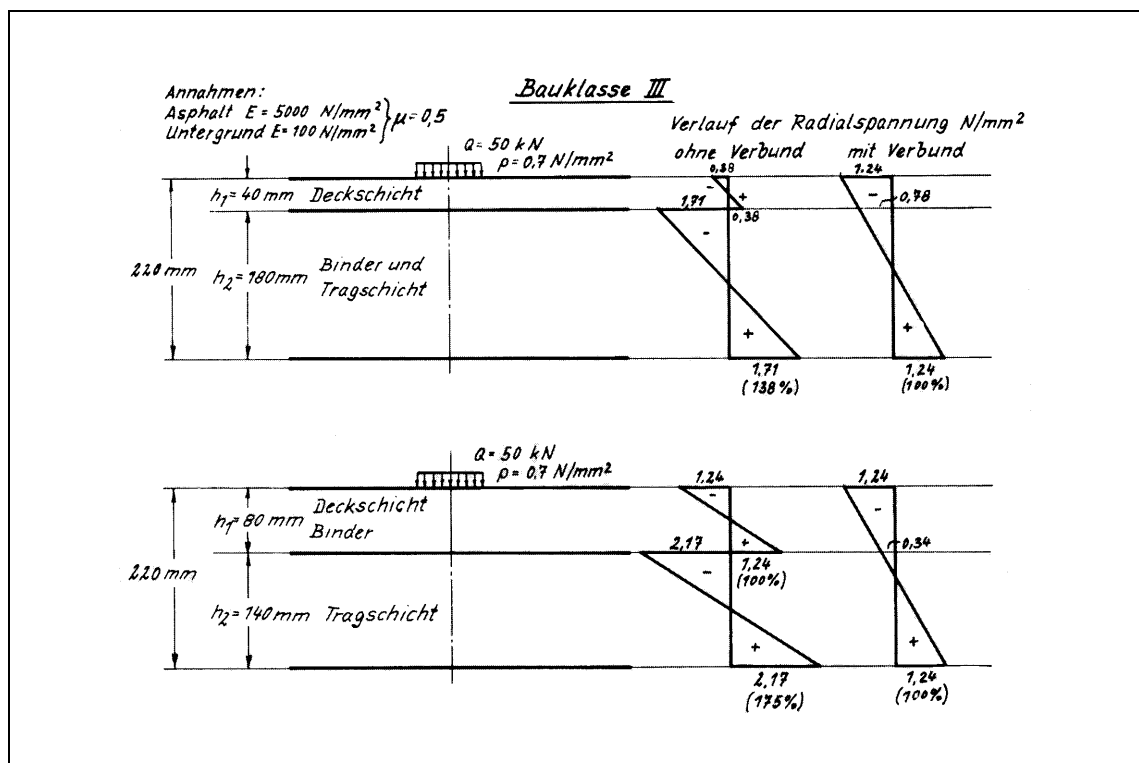


Abbildung 3-5: Verlauf der Radialspannung bei einer Asphaltdecke bei einem System mit und ohne Verbund (EISENMANN 1984)

Bei einem fehlenden Verbund zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht kann ein Anwachsen der Radialspannungen an der Unterseite der auf Biegung beanspruchten Asphalttragschicht um 30 bis 38 % festgestellt werden. Bei fehlendem Verbund zwischen Asphaltbinder- und Asphalttragschicht wächst die Radialspannung um 75 bis 91 % an. Gleichzeitig stellt sich nach EISENMANN eine Biegezugspannung an der Un-

terseite der Binderschicht ein. Beides führt zu einer erhöhten Beanspruchung der Asphaltkonstruktion verbunden mit vorzeitigen Rißbildungen.

EISENMANN befaßt sich in seinem Untersuchungsbericht mit einem weiteren Phänomen: der Abhebung der Decke (Abbildung 3-6). Bei nicht vorhandenem Verbund zwischen Deck- und Binderschicht liegen zwei voneinander getrennte Platten vor, die einen unterschiedlichen Verlauf des Abhebens zeigen. Dies kann zu einer Spaltbildung führen, die wiederum einen negativen Einfluß auf die Dauerhaftigkeit der Deckschicht besitzen kann.

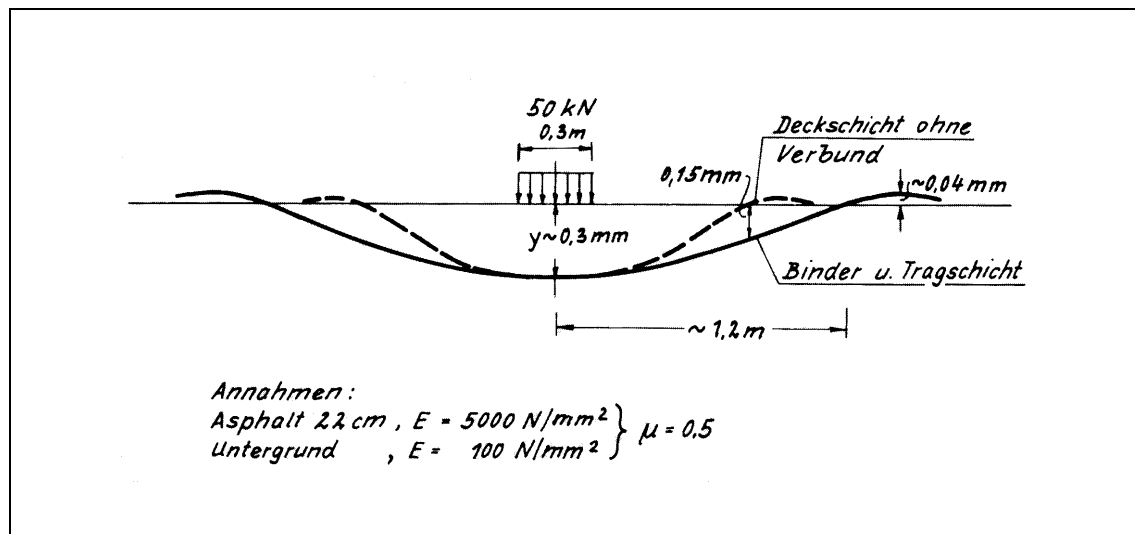


Abbildung 3-6: Biegelinie einer 22 cm dicken Asphaltdecke bei gelöstem Verbund zwischen Deck- und Binderschicht (EISENMANN 1984)

In den 1991 publizierten Forschungsergebnissen von WEBER wird die Rißbildung in Asphaltstraßen als Folge mangelhaften Schichtenverbundes dargestellt. Die Untersuchungen werden auf theoretischem Weg mit Hilfe der Finiten Element Methode (FEM) durchgeführt. Dabei kommt die an der TU München entwickelte Programmkette SET zum Einsatz. Er führt aus, daß Längs- und Querrisse an der Deckschichtunterseite in stark belasteten Verkehrswegen auf Biegezugspannungen bei überlagerten Temperaturspannungen infolge einer Deckschichtablösung zurückzuführen sind.

Zwei besondere Beanspruchungen des Asphaltoberbaues als Folge eines mangelhaften Schichtenverbundes werden untersucht und dargestellt: das Schichtgleiten und die Spaltbildung. Abbildung 3-7 zeigt Berechnungen zum *Schichtgleiten*. Dargestellt ist die ermittelte Horizontalverschiebung der Deck- und Binderschicht eines Asphaltoberbaues der Bauklasse I. Es ist zu erkennen, daß im Bereich unmittelbar außerhalb der Lasteinleitungsfläche eine relativ große gegensätzliche Verschiebung an der Schichtgrenze stattfindet. Dieser Bereich wird durch den überrollenden Verkehr am stärksten beansprucht. Eine eventuelle Schwächung noch vorhandener Bereiche mit vollem Ver-

bund ist denkbar und kann zu einer fortschreitenden Auflösung des Schichtenverbundes führen.

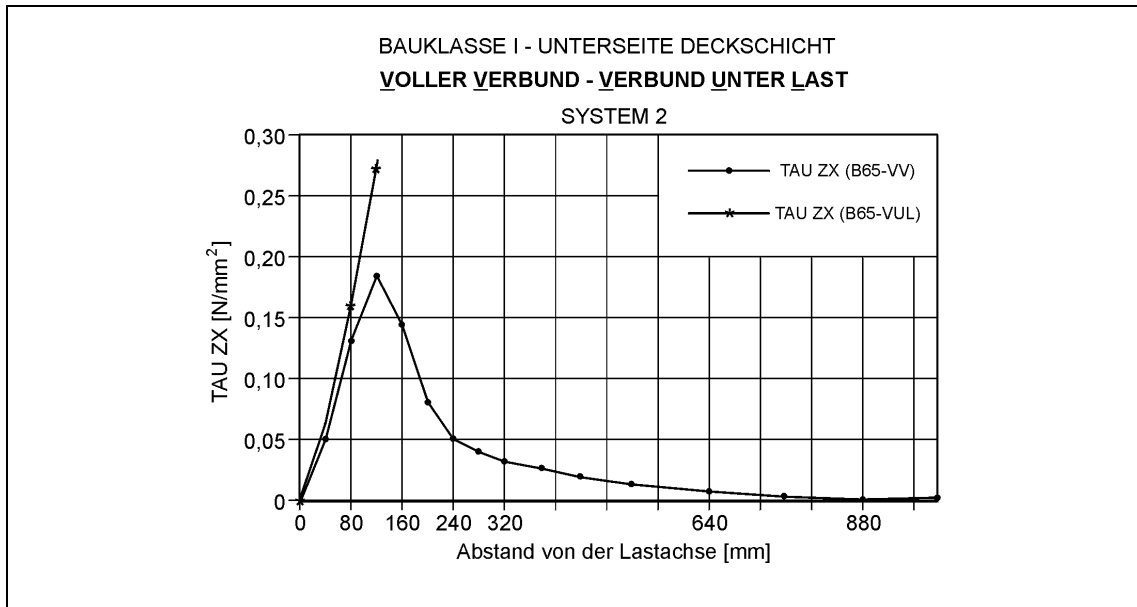


Abbildung 3-7: Schubspannungen für Bauklasse I an der Deckschichtunterseite  
( $Q = 50 \text{ kN}$ ,  $p = 0,868 \text{ N/mm}^2$ ) (WEBER 1991)

Abbildung 3-8 zeigt Berechnungen mittels FEM der zweiten Beanspruchung des Asphaltoberbaues durch fehlenden bzw. schlechten Schichtenverbund: der *Spaltbildung*. Wie bereits von EISENMANN dargestellt, wird von einem Modell zweier verbundlos aufeinander liegender Platten ausgegangen, die unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen. Eine Spaltbildung ist dann zu erwarten, wenn die Schicht geringerer Steifigkeit in der oberen Lage angeordnet wird.

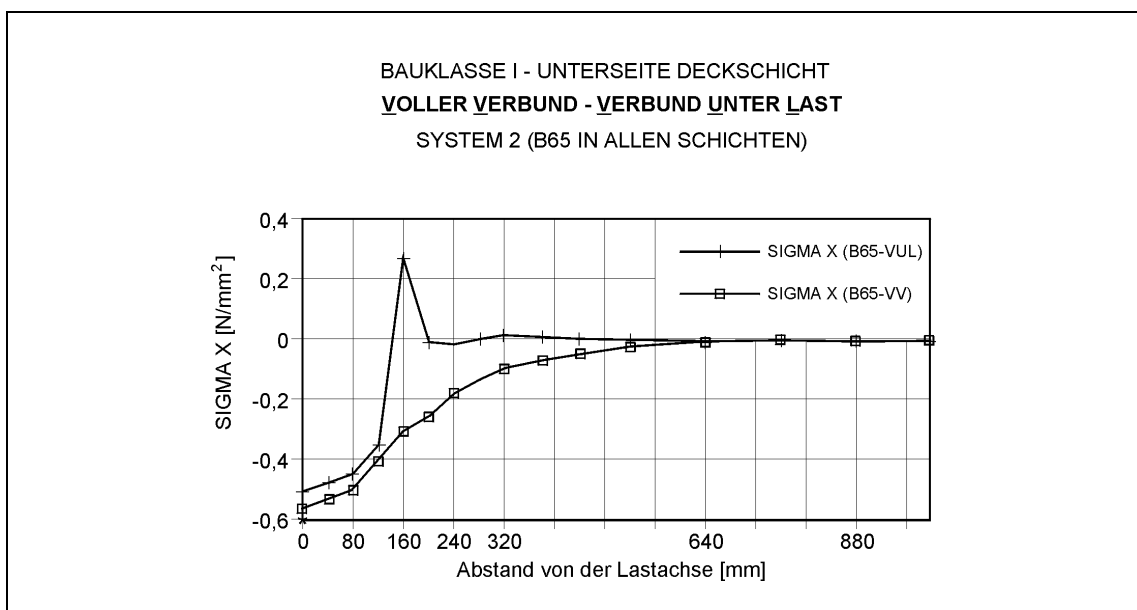


Abbildung 3-8: Biegezugspannung an der Deckschichtunterseite für Bauklasse I  
( $Q = 50 \text{ kN}$ ,  $p = 0,868 \text{ n/mm}^2$ ) (WEBER 1991)

WEBER führt den rechnerischen Nachweis dieser Spaltbildung am Beispiel eines Asphaltoberbaus der Bauklasse I. Er kann nachweisen, daß der Effekt der Spaltbildung grundsätzlich auch im Asphaltstraßenbau auftritt. Die für das Abheben der Deckschicht ausschlaggebenden Vertikalspannungen sind jedoch sehr gering, so daß eine rasche Fortschreitung der Schädigung des Asphaltkörpers aufgrund dieses Effektes nur von untergeordneter Bedeutung ist. Zusammenfassend kommt WEBER in seinen Untersuchungen zu folgenden Ergebnissen:

- Die Verbundlösung zwischen Deck- und Binderschicht führt zu einer radialen Biegezugbeanspruchung an der Unterseite der Tragschicht.
- Es ist ein Ansteigen der horizontalen Schubspannung in der gelösten Grenzschicht zu verzeichnen.
- Es tritt eine Spannungsumlagerung auf.

Der Vergleich zwischen den Bauklassen I und III zeigt, daß in Bauklasse III prozentual höhere Spannungsumlagerungen bzw. -erhöhungen auftreten. Der Fahrbahnaufbau nach Bauklasse III läßt eher Risse aus der Binder- bzw. Tragschicht erwarten als der Aufbau gemäß Bauklasse I.

ANGER (1991) befaßt sich in seiner Dissertation mit Untersuchungen zum Schichtenverbund im Mehrschichtsystem, indem er den Einfluß des Verbundes der Konstruktionsschichten auf das Spannungs- und Verformungsverhalten einer Asphaltstraßenkonstruktion untersucht. Es sollte der Einfluß des Verbundes auf das Spannungsverhalten am Beispiel einer flexiblen Straßenkonstruktion dargestellt werden. Zur Simulation eines abgestuften Verbundes wurde eine Versuchsstrecke mit einer Hitzeschutzfolie mit gestanzten bzw. geschnittenen Löchern zwischen den Asphaltsschichten eingerichtet und Tragfähigkeitsmessungen vorgenommen. Der Schichtenverbund wurde an Bohrkernen und an im Labor hergestellten Probekörpern untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, daß ein verminderter Schichtenverbund Einfluß auf die Spannungen der Straßenkonstruktion ausübt. So sind z.B. die Radialspannungen bei fehlendem Schichtenverbund um ca. 64 % größer als bei vollem Verbund.

In einem Forschungsbericht zu Auswirkungen von Verbundstörungen auf die Spurrinnenbildung stellen EISENMANN und NEUMANN (1993) dar, daß ein optimaler Verbund für einen hohen Widerstand gegen Spurrinnenbildung der Asphaltbefestigung erforderlich ist. Den Versuchen ist auch zu entnehmen, daß Verschmutzungen sowie eine erhöhte Anspritzmenge zu einem schlechten Verbundverhalten führen.

Als Folge von mangelhaftem Schichtenverbund treten nach DÜBNER und GLET (1993) bei Zusammenwirken mehrerer negativer Einflußfaktoren neben Rissen auch Verformungen und Ausbrüche auf. So können sich in der Deckschicht Netzzrisse bilden, die



vor allem im Rand- und Nahtbereich bei entsprechender Beanspruchung zu finden sind. In Nähten eintretendes Wasser hebt den Schichtenverbund auf, wodurch Risse entstehen können. Die entstehenden Netzzrisse durch fehlenden Verbund haben ein Loslösen der Deckschicht von der Unterlage zur Folge. Die lose Deckschicht kann somit leicht durch die Verkehrsbeanspruchung schollenförmig zerstört werden. Der Schaden der Deckschicht hat wiederum zur Folge, daß Schlaglöcher und/oder Tragfähigkeitsrisse in den unteren Asphaltsschichten auftreten können. Auch Spurrinnen sind in stark belasteten Bereichen anzutreffen. Solche stark durch Schubkräfte belastete Stellen einer Straße befinden sich vor allem im Bereich von Kurven, Steigungen und Lichtsignalanlagen.

AL HAKIM (1996) berichtet über Untersuchungen zur Berücksichtigung des Fehlers über die Annahme des Schichtenverbundes bei der Rückrechnung der Schichtmoduli unter Bestimmung der verbleibenden Nutzungsdauer. Es werden vier unterschiedliche Fahrbahnaufbauten untersucht. Mit Hilfe des BISAR Programmes werden die Horizontaldehnungen an der Unterseite der Asphaltsschichten und Vertikaldehnungen an der Oberseite der ungebundenen Schottertragschicht berechnet. Außerdem wird die Oberflächeneinsenkung der Befestigung berechnet. Der Schichtenverbund wird über den AK-Wert variiert. Mit den Ergebnissen wird für jeden Verbundzustand die Nutzungsdauer berechnet. Die Oberflächeneinsenkungen wurden als Eingangswerte für die Rückrechnung zur Bestimmung der Moduli der Asphaltbinder- und Tragschicht, Schottertragschicht und des Untergrundes verwendet. Der Modul der Deckschicht wird als konstant angenommen. Der Schichtenverbund zwischen Deck- und Binderschicht beträgt 100 %. Die ermittelten Moduli aus der Rückrechnung werden erneut einer Dehnungsberechnung mit dem BISAR Programm unterzogen und die Nutzungsdauer bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, daß die Nutzungsdauer, bei der die Beanspruchung mit rückgerechneten Schichtmoduli unter Annahme eines vollen Verbundes berechnet wurden, bis zu 70 % Fehler aufweisen, wenn der tatsächliche Verbund nicht voll vorhanden ist. Diese Erkenntnis findet in der Praxis vor allem dann Bedeutung, wenn die Bestimmung der Schichtmoduli durch z.B. Rückrechnung aus den Einsenkdaten mit dem Falling Weight Deflectometer notwendig ist und wenn mit den berechneten Moduli Aussagen zur erwarteten Restnutzungsdauer getroffen werden sollen (Leutner u.a., 1998).

### **3.3 Anforderungen an den Schichtenverbund**

FENZ u.a. (1987) berichten über Untersuchungen zum Schichtenverbund von Asphaltbefestigungen in Österreich. An 17 Straßenabschnitten unterschiedlichen Aufbaus und Alters wurden Bohrkerne entnommen und die Zug- und Scherfestigkeiten der einzelnen

Schichtgrenzen ermittelt. Die Ergebnisse zeigen hohe Scherfestigkeiten bis zu 3,5 N/mm<sup>2</sup> bei sauberen und ausreichend vorgespritzten Grenzflächen und niedrigere Scherfestigkeiten bei schlecht gereinigten Unterlagen. Weiterhin wird berichtet, daß der Schichtenverbund insgesamt durch ausgemagerte Schichten, Rundkörnungen, Haftfähigkeitsprobleme und Alterserscheinungen herabgesetzt wird. Aus den Versuchsergebnissen werden folgende Anforderungen an den Schichtenverbund vorgeschlagen:

- eine Mindestabreißfestigkeit von 1,0 N/mm<sup>2</sup> bzw. Mindestscherfestigkeit von 3,0 N/mm<sup>2</sup> bei Schichtgrenzen bis 12 cm unter Fahrbahnoberkante,
- eine Mindestabreißfestigkeit von 0,8 N/mm<sup>2</sup> bzw. Mindestscherfestigkeit von 2,0 N/mm<sup>2</sup> bei tiefer liegenden Grenzflächen.

Die Prüfung wird an Serien von jeweils fünf Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm durchgeführt.

CODJIA (1994) und CHARIF (1995) veröffentlichen Ergebnisse einer Forschungsarbeit der TU Karlsruhe, deren Ziel die Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für das Prüfverfahren „Schichtenverbund nach LEUTNER“ und dessen Präzisionswert ist. Mit Hilfe statistischer Analyseverfahren wird die Abhängigkeit zwischen Asphaltkenndaten und den ermittelten Scherkräften und Scherwegen untersucht. Es zeigt sich, daß die Mischgutart der oberen Schicht, der Bindemittelgehalt der unteren Schicht und der Verdichtungsgrad aller Schichten einen signifikanten Einfluß auf die Scherkraft und den Scherweg ausüben. Es werden Vorschläge für Anforderungswerte an einen Mindestschichtenverbund bei 20°C für verschiedene Schichtenkombinationen hergeleitet, die sich auf die jeweils kleinsten Meßwerte der Datensätze gründen:

- 14 kN Asphaltdeckschicht (ADS) - Asphaltbinderschicht (ABI)
- 10 kN Asphaltbinderschicht - Asphalttragschicht (ATS)
- 13 kN Asphaltdeckschicht - Asphalttragschicht.

Die Abbildungen 3-9 und 3-10 zeigen den Zusammenhang zwischen den ermittelten Scherkräften und dazugehörigen Scherwegen für die Schichtgrenzen ADS - ABI und ABI - ATS. Auf Grundlage dieser Abhängigkeiten wird ein Bewertungshintergrund erarbeitet und es werden Anforderungswerte für die genannten Schichtgrenzen vorgeschlagen. Es werden die zwei Bereiche I und II definiert. Bereich I umfaßt alle Meßergebnisse mit hinreichendem Schichtenverbund. Liegen die Prüfergebnisse im Bereich II, liegt kein hinreichender Schichtenverbund vor. Der Bereich I ist in weitere Unterbereiche unterteilt, die Aussagen zur Höhe der ermittelten Scherwege geben sollen:

- Bereich A: kleine Scherwege
- Bereich B: mittlere Scherwege (ca. 90 % aller Meßwerte)
- Bereich C: große Scherwege.

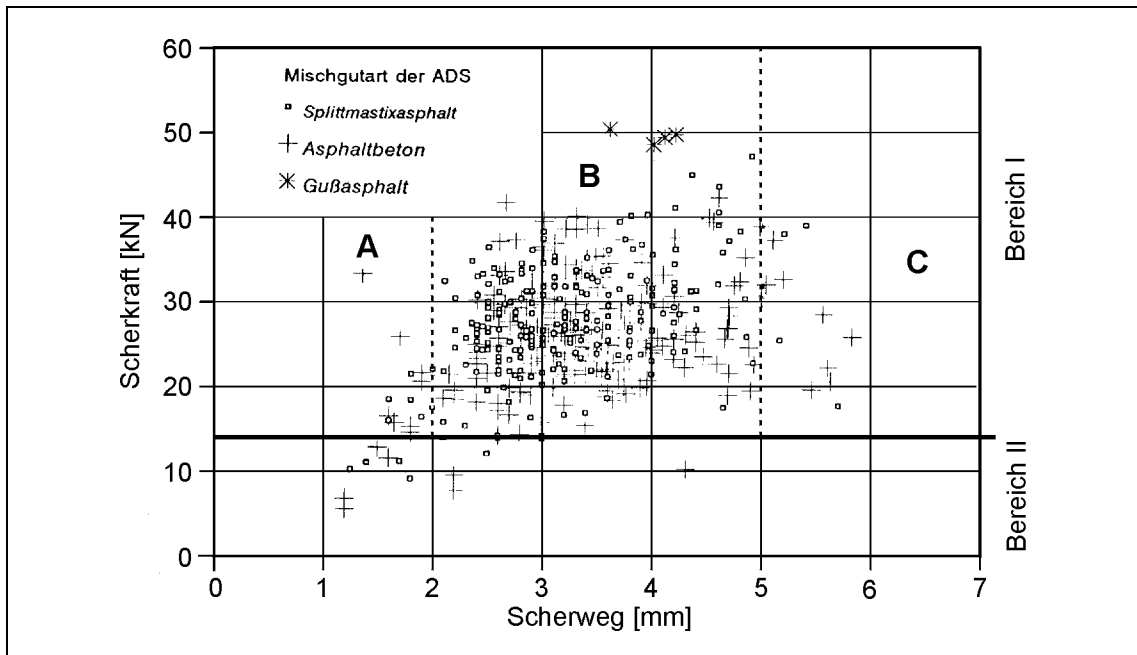


Abbildung 3-9: Bewertungshintergrund für die Schichtgrenze ADS/ABS (CODJIA 1994)

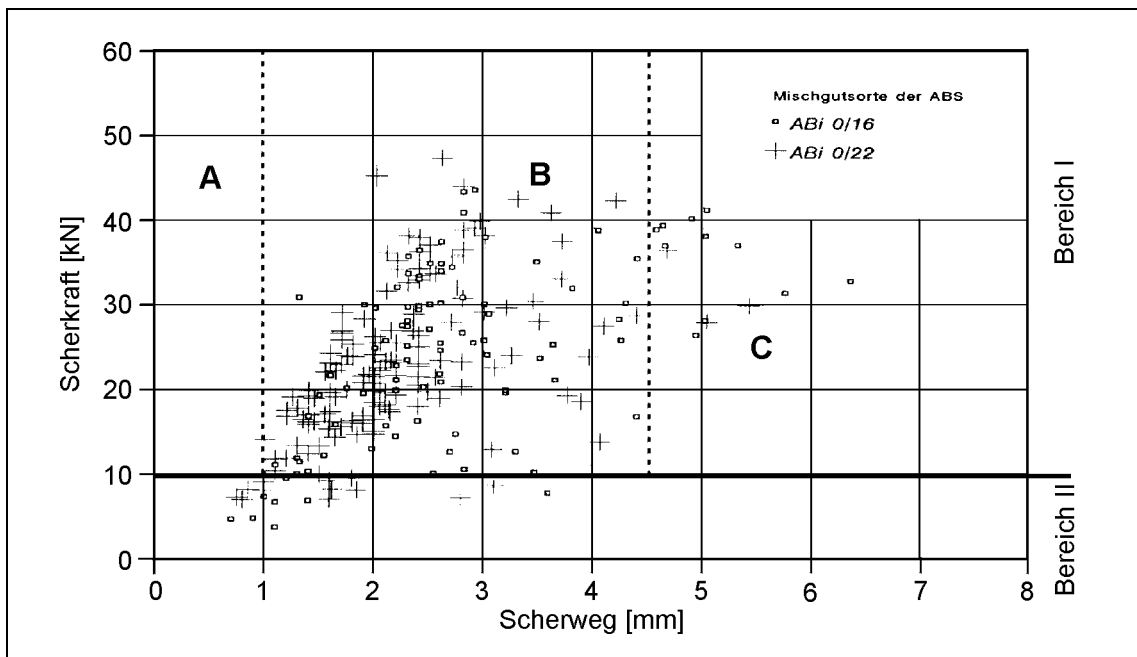


Abbildung 3-10: Bewertungshintergrund für die Schichtgrenze ABS / ATS (CODJIA 1994)

Die Bestimmung der Präzision des Prüfverfahrens wurde an Bohrkernen unterschiedlicher Straßenaufbauten im Rahmen eines Ringversuches ermittelt. Die von CODJIA ermittelten Ergebnisse für die Präzision des Prüfverfahrens „Schichtenverbund nach LEUTNER“ sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Tabelle 3-1: Ergebnisse Präzision (CODJIA 1994)

		Scherkraft	Scherweg
Wiederholgrenze	r	9,70 kN	0,90 mm
Wiederholstandardabweichung	S <sub>r</sub>	± 3,50 kN	± 0,30 mm
Vergleichsgrenze	R	16,00 kN	1,40 mm
Vergleichsstandardabweichung	S <sub>R</sub>	± 5,70 kN	± 0,50 mm

Die Ergebnisse zeigen hohe Prüffehler, die - verbunden mit relativ niedrig formulierten Anforderungswerten - zu größeren Diskussionen in den Fachgremien führten. Diese hohen Prüffehler sind jedoch nicht auf das Prüfverfahren selbst, sondern auf die Inhomogenität der Proben (Bohrkerne aus Neubaustecken) zurückzuführen.

KRZEMIEN und TSCHEGG (1995) formulieren in ihrem Bericht „Schichtenverbund von Asphalt - Prüfung und Qualitätsabzüge“ Abnahmewerte für die Prüfung des Schichtenverbundes. Basierend auf Untersuchungsergebnissen zweier Autobahn-Baulose mit insgesamt sechs unterschiedlichen Asphaltaufbauten werden Mindestwerte für die Haftzugfestigkeit von 1,0 N/mm<sup>2</sup> bei Verwendung von nicht modifizierten und 1,5 N/mm<sup>2</sup> bei Verwendung von modifizierten Vorspritzmitteln empfohlen. Diese Empfehlungen wurden 1997 in die österreichische Norm RVS 11.065, Blatt 5 für Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Prüftemperatur von 20°C aufgenommen. Parallel zur Haftzugprüfung im o.g. Bericht wurde der Schichtenverbund mittels Keilspaltverfahren ermittelt. Für diese Prüfverfahren gibt es keine Anforderungswerte, da noch keine ausreichenden praktischen Erfahrungen vorliegen.

RAAB und PARTL (1999) veröffentlichen einen Forschungsbericht der Eidgenössischen Material- und Forschungsanstalt (EMPA), in dem Methoden zur Beurteilung des Schichtenverbundes von Asphaltbelägen untersucht werden. Wesentliches Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer einfachen, praxisnahen Untersuchungsmethodik zur Bestimmung des Schichtenverbundes sowie die anschließende Überprüfung ihrer Aussagefähigkeit für unterschiedliche Belagsarten. Im Rahmen umfangreicher Voruntersuchungen wurde die direkte Scherprüfung evaluiert. Das Schergerät stellt hinsichtlich der Einspannvorrichtung und Scherbackeneinsätze eine Modifikation zum in Deutschland eingesetzten Schergerät nach LEUTNER dar (siehe Abbildung 3-11).

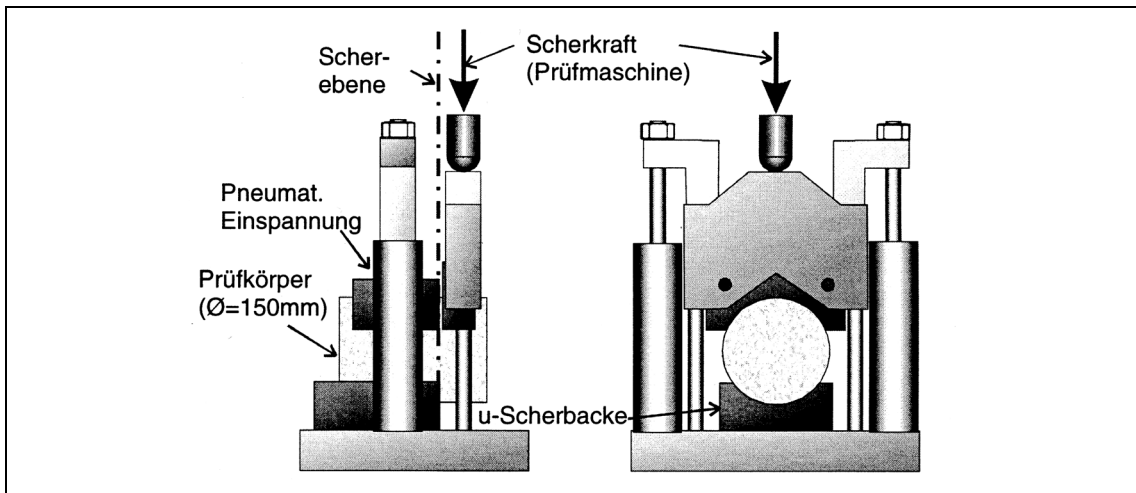


Abbildung 3-11: EMPA-Scherprüfform mit u-förmigen Scherbackeneinsätzen (RAAB und PARTL 1999)

Abscherprüfungen an beiden Geräten zeigen eine sehr gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Auf der Basis zahlreicher Abscherversuche und Vergleichsuntersuchungen zwischen Verbund- und Schichtscherkraft<sup>1</sup>, die einen linearen Zusammenhang zeigen, wird für Asphaltbeton- bzw. Splittmastixasphaltdeckschichten gemäß Abbildung 3-12 ein Anforderungswert von 23 kN (20°C, Bohrkerndurchmesser 150 mm) als Mindestsollwert vorgeschlagen.

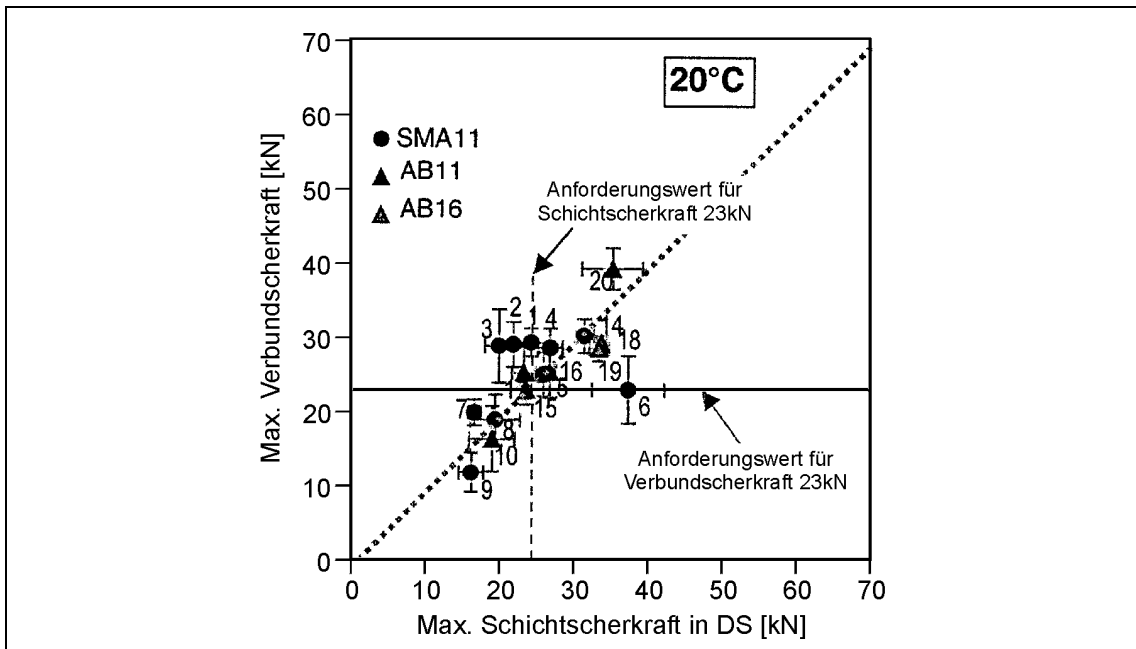


Abbildung 3-12: Anforderungswerte für Beläge mit Splittmastix- bzw. Asphaltbetondeckschicht (RAAB und PARTL 1999)

<sup>1</sup> Die Bohrkern wurden innerhalb der Schichtgrenze (Schichtscherkraft) und innerhalb der Asphaltdeckschicht (Verbundscherkraft) abgescher.

### 3.4 Prüfung des Schichtenverbundes

Nach heutigem Stand der Technik werden für die Prüfung des Schichtenverbundes folgende Verfahren eingesetzt:

- Keilspaltverfahren,
- Haftzug-/Abziehversuch,
- Torsionsversuch,
- Einfache Scherprüfung,
- Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner.

Diese werden nachstehend beschrieben.

#### Keilspaltverfahren

Erste Erkenntnisse über den Schichtenverbund von Asphaltbefestigungen liefern die Arbeiten von KRENKEL (1957), der die Scherfestigkeit mittels Keilschlag ermittelte. Dabei trifft ein Fallgewicht aus definierter Höhe auf einen Schlagkeil, der auf dem Asphaltkörper aufsitzt. Maßgebend für die Versuchsauswertung sind die durch Schlagzahl und Eindringtiefe entstehenden Vertikal- und Horizontalkräfte, die mittels Mohr'schen Spannungskreises in Hauptspannungen umgerechnet werden können.

Mit Hilfe der erweiterten und optimierten Keilspaltmethode nach TSCHEGG (1996) werden Prüfergebnisse ermittelt, die von Probekörpergröße und -form unabhängige Materialkennwerte darstellen. Anhand von Last-Verschiebungsdiagrammen lassen sich die maximale Spaltkraft  $F_{\max}$ , die nominelle Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  sowie die spezifische Bruchenergie  $G_f$ , die den Widerstand gegen Rißausbreitung im Verbund charakterisiert, ermitteln. Das Prinzip der Prüfmethode ist in Abbildung 3-13 dargestellt.

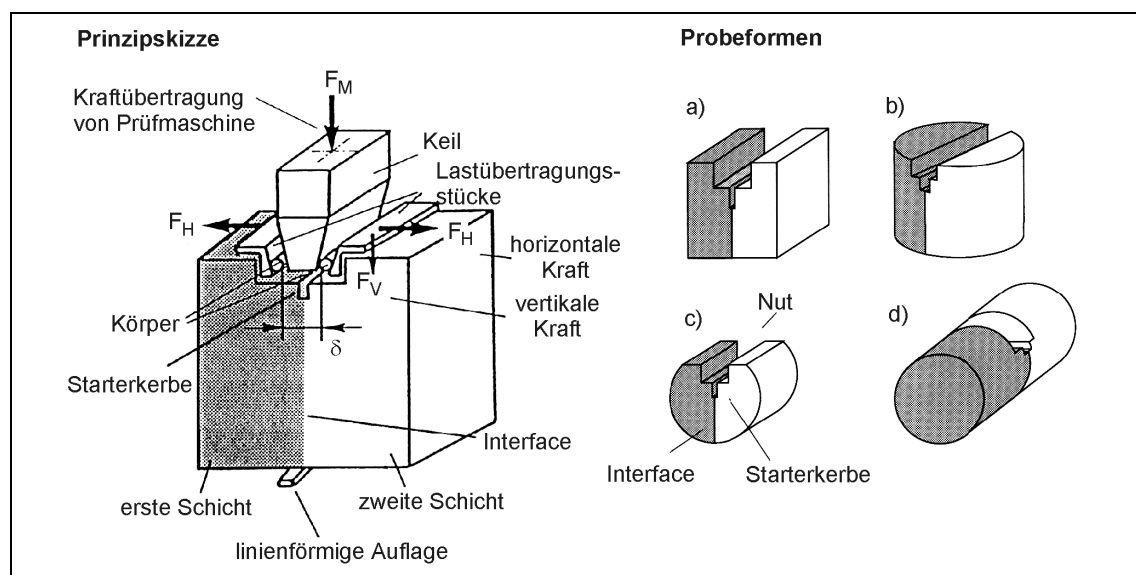


Abbildung 3-13: Prinzip der Keilspaltmethode, Probeformen für den Keilspaltversuch (TSCHEGG 1996)

Bei diesem Verfahren ist jedoch zu beachten, daß durch das Einfräsen der Nut unter Umständen eine Schädigung des Verbundes eintreten kann.

### **Haftzug-/ Abziehversuch**

FENZ u.a. (1986) zeigt, daß Abziehversuche prinzipiell für die Untersuchung des Verbundes dünner Deckschichten auf Asphaltbelägen anwendbar sind. Die Versuchsdurchführung ähnelt der Prüfung der Abreißfestigkeit an Betonbauteilen gemäß den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (ZTV-SIB 90)“. Mittels Kernbohrung wird eine von einer Ringnut begrenzte definierte Kreisfläche hergestellt. Darauf wird eine biegesteife Prüfplatte gleichen Durchmessers aus Stahl mit einem schnell aushärtenden Kunstharzkleber aufgebracht. Diese Prüfplatte wird mit einer Kraft  $F$  unter konstanter Belastungsgeschwindigkeit einer Zugbelastung ausgesetzt, die zum Abreißen der Probe führt. Die aufgewandte Höchstlast wird bestimmt. Die Abreißfestigkeit ergibt sich zu:

$$\beta_A = \frac{F_{A,max}}{A_P} \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} F_{A,max} & \text{Abreißkraft} \\ A_P & \text{Fläche der Prüfplatte} \end{array}$$

In Bezug auf Asphaltprüfungen empfehlen FENZ u.a. (1987), die Abziehversuche an Prüfflächendurchmessern von 100 mm bei  $10 \pm 1^\circ\text{C}$  durchzuführen.

GRAF und VASSILIOU (1997) berichten über Untersuchungsergebnisse zur Prüfung der Haftzugfestigkeit von dünnen Schichten im Kalteinbau (DSK) und stellen fest, daß eine quantitative Erfassung des Verbundes von DSK-Schichten im Labor realisierbar ist. Von der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde im Forschungsprogramm 1998 ein Projekt zur "Qualifizierung des Schichtenverbundes von dünnen Schichten im Heißeinbau mit dem Abziehversuch" vergeben. Der Schlußbericht liegt derzeit noch nicht vor.

Die Abbildung 3-14 zeigt schematisch die Prüfung von Asphaltbohrkernen auf Abreißfestigkeit.

Die Haftzugprüfung ist ein Verfahren zur Prüfung des Schichtenverbundes, das gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.1 bereits Eingang in die österreichische Norm (RVS 11.065) gefunden hat. In Deutschland wurde die Haftzugprüfung in die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen - Asphaltbauweisen - ZTV BEA-StB“ (FGSV, 1998) für die Prüfung von dünnen Schichten im Kalteinbau (DSK) aufgenommen.

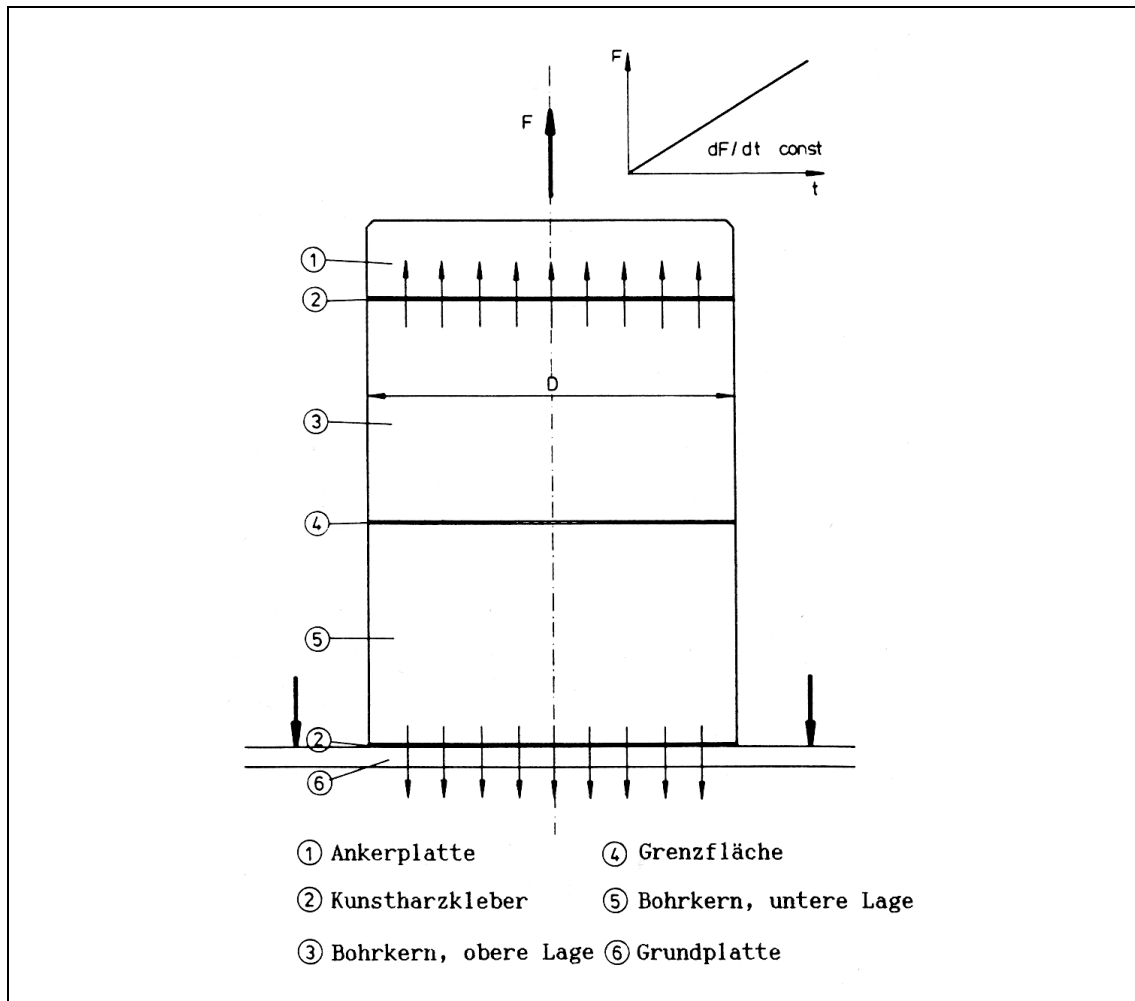


Abbildung 3-14: Schematische Darstellung der Prüfung von Bohrkernen mit dem Abreißversuch (FENZ, 1987)

### Torsionsversuch

Zur Erfassung von Verformungen infolge Schubbeanspruchung hat VELSKE (1982) eine Meßeinrichtung entwickelt, bei der Marshall-Probekörper symmetrisch mit einer konstanten Gewichtskraft auf Torsion beansprucht werden. Dabei werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm an beiden Stirnseiten eingeklebt und gegeneinander verdreht. Der schwächste Querschnitt bestimmt das Prüfergebnis. Die Prüftemperatur beträgt 40°C. Die Aufzeichnung der Verdrehung pro Zeit erfolgt elektronisch über Induktiv-Wegaufnehmer, Meßverstärker und Schreiber. Abbildung 3-15 zeigt die Meßapparatur. Die Vorgabe einer Torsionsebene bei mehrschichtigen Probekörpern ist nicht möglich (CHARIF, 1995).



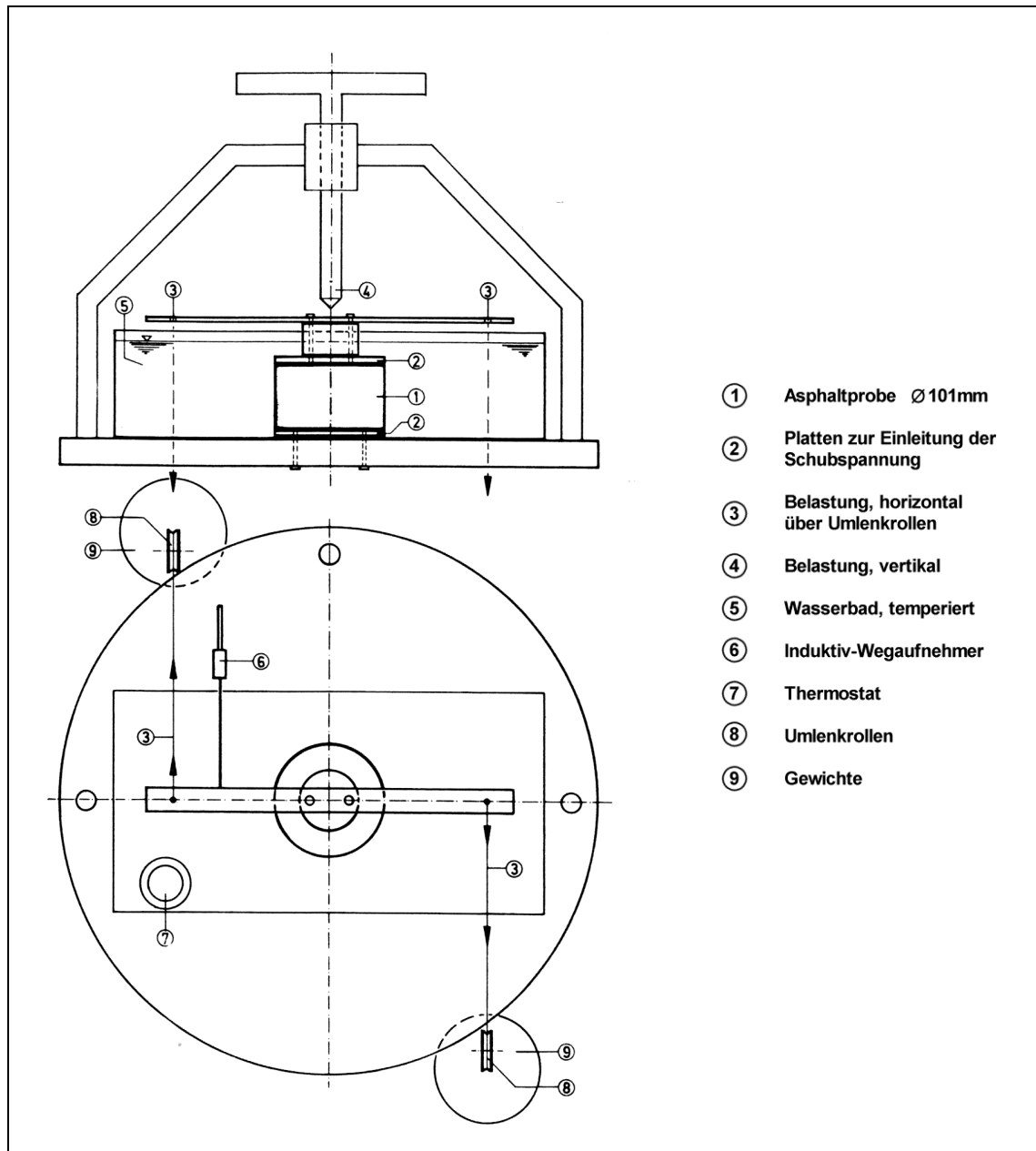


Abbildung 3-15: Torsionsversuch (VELSKE 1982)

### Einfache Scherprüfung

Im Rahmen des amerikanischen Forschungsprogrammes SHRP (HERRIGAN, 1994) wurde eine Prüfmaschine zur Durchführung der einfachen Scherprüfung entwickelt. Diese ist in Abbildung 3-16 dargestellt. Diese Vorrichtung dient jedoch der Bestimmung bleibender Deformationen und Moduli innerhalb einer Belagsschicht und wird nicht zur Beurteilung des Verbundes herangezogen.

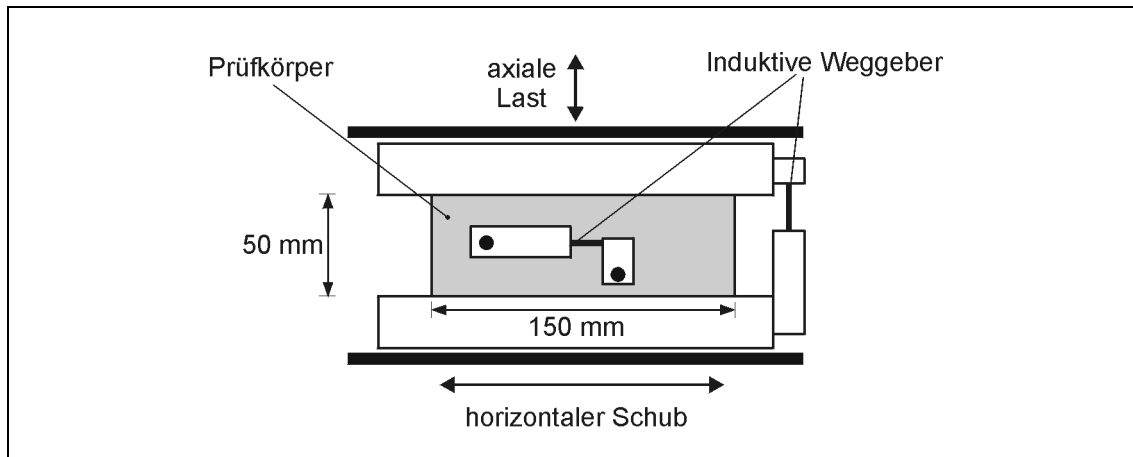


Abbildung 3-16: SUPERPAVE Schubprüfvorrichtung SST (HERRIGAN 1994)

### Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER

LEUTNER weist 1979 auf die Dringlichkeit des Nachweises der erreichten Verbundwirkung zwischen den Asphaltschichten einer Straßenkonstruktion hin. Er entwickelt eine Prüfmethode und einen Geräteprototypen für den direkten Scherversuch. Es wird eine Analyse des Temperatureinflusses unter Berücksichtigung der Charakteristik der Mineralstoffgemische und der quantifizierten Oberflächenstruktur der jeweils kontaktierenden Schichten vorgenommen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird seit einigen Jahren der Schichtenverbund an Bohrkernen mit der nach LEUTNER entwickelten Scherapparatur geprüft. Der Versuch ist in der FGSV-Arbeitsanleitung „Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER, ALP-A Teil 4“ (FGSV, 1999) beschrieben und entspricht im Vergleich zu den o. g. Verfahren den tatsächlichen Beanspruchungen durch die Verkehrsbelastung am besten.

Bei der Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER wird ein Bohrkern mittels einer in die Marshallpresse integrierten Abschervorrichtung in seine einzelnen Schichten zerlegt. Der Bohrkern wird eingespannt und dann an der Schichtgrenze von Scherbacken mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit belastet. Es wird die Scherkraft in Abhängigkeit vom Scherweg in der Scherebene (Schichtgrenze) ermittelt. Das Maximum der Scherkraft kennzeichnet den Bruchzustand, bei dem der Verbund zwischen den beiden Schichten der Bewegung der Scherbacken nur geringer werdende Kräfte entgegenbringen kann. Die maximale Scherkraft und der dazugehörige Scherweg werden aus dem aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagramm abgelesen und als Kenngrößen festgehalten. Der Scherweg ist dabei die in Belastungsrichtung gemessene und korrigierte Verschiebung der Scherbacken beim Erreichen der maximalen Scherkraft. Die Korrektur ist zu Beginn der Messung nötig, da die Scherbacken erst in Position fahren müssen.

Das Schergerät (Abbildung 3-17) besteht gemäß Arbeitsanleitung (FGSV 1999) aus einem „zweiteiligen massiven Hauptrahmen aus Aluminium. Die beiden Teile sind zwei streng parallel in Kugelhülsen auf zwei gehärteten Präzisionsführungsstangen geführte, halbkreisförmige Scherbacken, die auf der gleichen Ebene wie die Scherebene liegen. In die Scherbacken sind gehärtete Scherbackeneinsätze aus Stahl eingelassen, die für Bohrkern mit einem Durchmesser von 148 mm bis 152 mm auswechselbar sind. Der zu prüfende Bohrkern wird mit einem Spannbügel über eine Klemmbacke mit eingelassenen Filzstreifen fixiert. An der Rückseite des Schergerätes ist für lange Bohrkern eine Auflagerung angebracht. Diese zusätzliche Führung erfolgt durch zwei Auflagerstangen, die mittels Exzenter auf die unterschiedlichen Bohrkerndurchmesser einstellbar sind.“

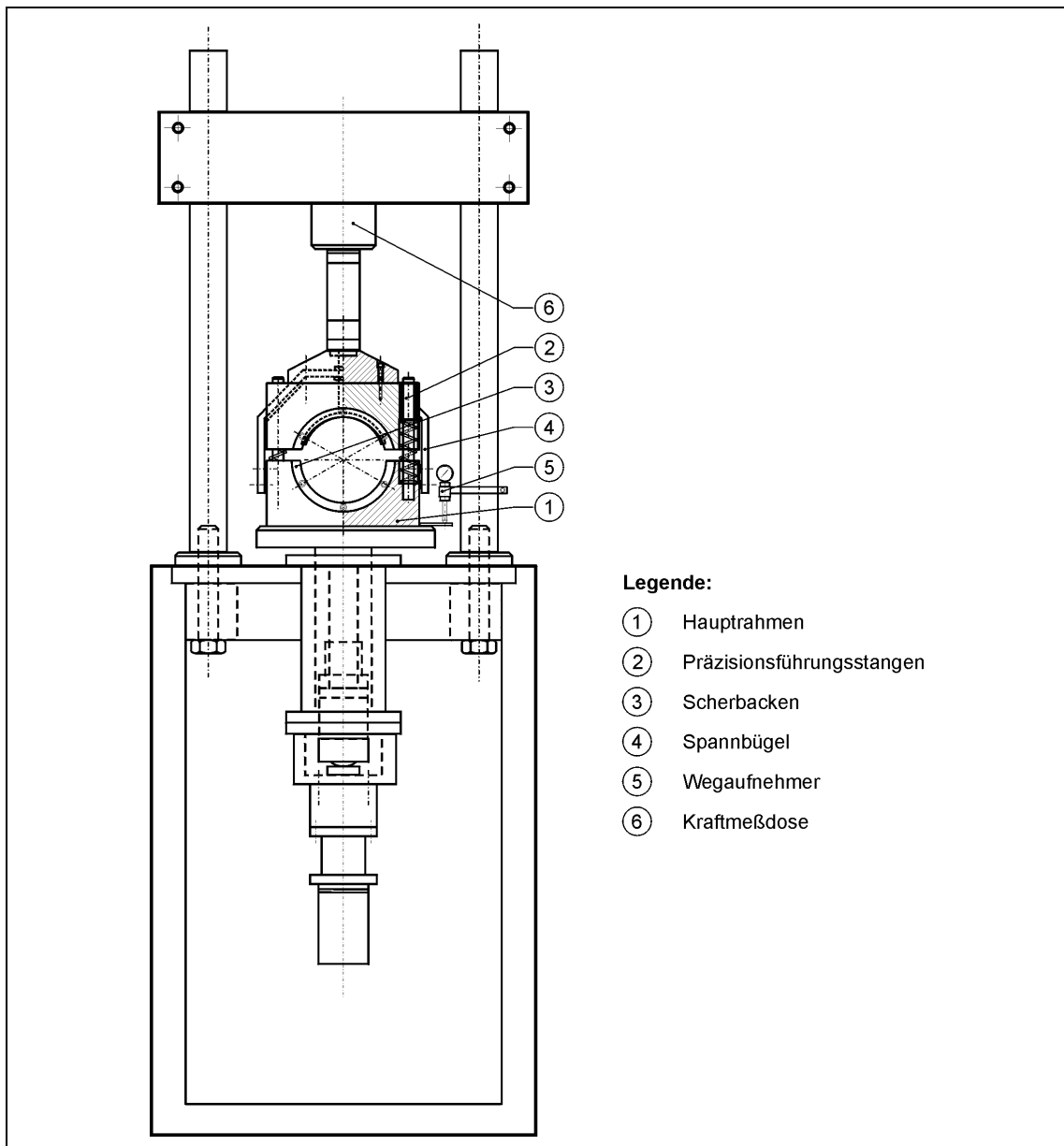


Abbildung 3-17: Marshallpresse mit integriertem Schergerät nach LEUTNER

Der Verlauf des Kraft-Weg-Diagramms ist charakteristisch für das Bruchverhalten eines Materialverbundes. In Abbildung 3-18 ist der allgemeine Verlauf beschrieben.

Bereich a ist die Anpassungsphase zwischen Prüfkörper und Scherform. Abhängig vom Durchmesser und der Größe der Scherbackeneinsätze ist diese Phase unterschiedlich stark ausgeprägt.

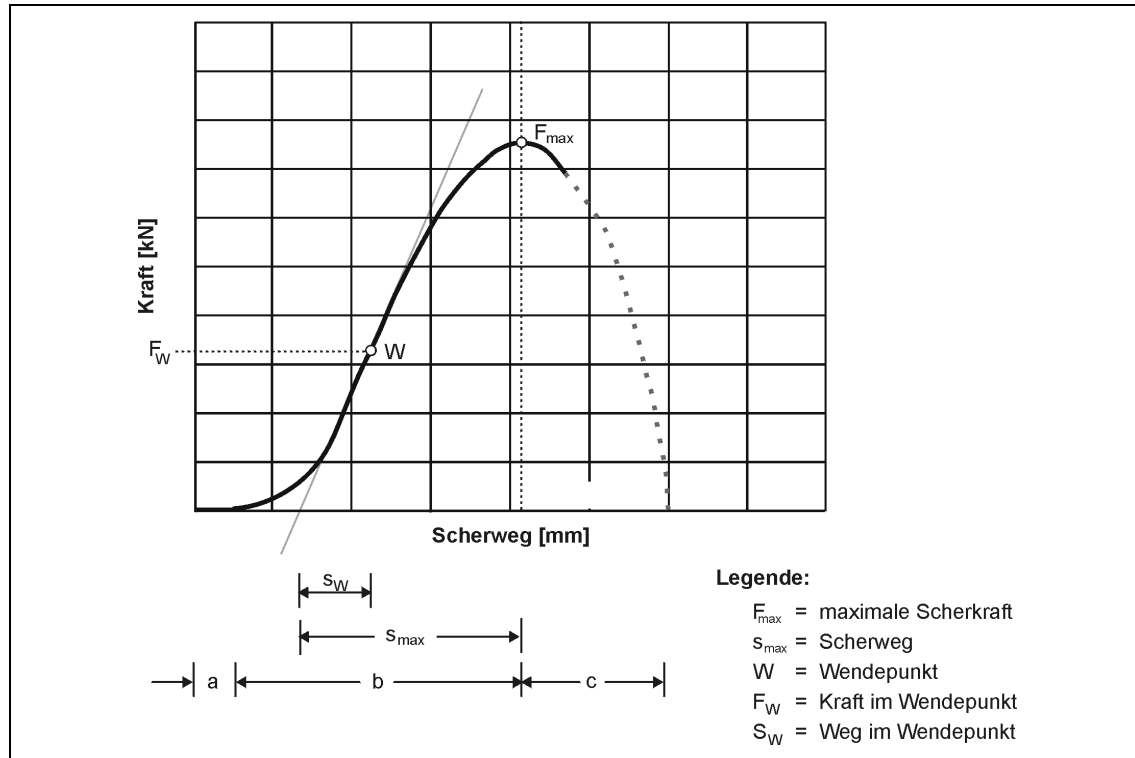


Abbildung 3-18: Darstellung des Kraft - Weg - Diagramms

Bereich b stellt den Anstieg der Kraft-Weg-Kurve dar. Er wird zunächst bestimmt durch die elastischen Eigenschaften des Prüfkörpers. Mit zunehmender Belastung kommt es zur Ausbildung von Mikrorissen, die durch das heterogene Gefüge des Asphaltes in der Matrix oder durch lokale plastische Verformungen hervorgerufen werden (TSCHEGG u.a. 1996). Hier liegt der Wendepunkt der Kurve. Am Wendepunkt liegt der größte Anstieg der Kraft-Weg-Kurve vor. Mit zunehmender Belastung nimmt die Anzahl und Länge der Mikrorisse zu. Im Bereich des schwächsten Probenquerschnittes erfolgt der Bruch ( $F_{\max}$ ).

Bereich c kennzeichnet den Abfall der Kraft-Weg-Kurve. Er kann steil verlaufen. Dies ist i.d.R. bei vollständiger Trennung der Schichten der Fall. Ein abgerundetes Maximum mit langsamerem Kurvenabfall spricht dagegen für noch einzelne Verbindungen zwischen den gegenüberliegenden Probenhälften, die durch Zuschlagkörner bzw. Bitumenbrücken hervorgerufen werden (TSCHEGG u.a. 1996).

## **4 Methodik des Vorgehens**

### **4.1 Ziel und Abgrenzung der Untersuchungen**

Die Aufnahme vertragsrelevanter Anforderungs- bzw. Abnahmewerte für den Schichtenverbund in ein Technisches Regelwerk setzt die Kenntnis der Präzision des Prüfverfahrens und einen Bewertungshintergrund zur Beurteilung der Prüfergebnisse voraus. Diese beiden Schwerpunkte stellen das Ziel der vorliegenden Arbeit dar. Die einzelnen Bearbeitungsschritte der methodischen Vorgehensweise sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

Die Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER hängt von zahlreichen Einflußgrößen ab, deren Erfassung und Verknüpfung einen kaum zu bewältigenden Untersuchungsrahmen fordern. Ein Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Bestimmung der Präzision des Prüfverfahrens. Dabei sollen die Schwankungen der Ergebnisse aufgrund der Parameter des Gerätes erfaßt und der Einfluß einzelner Prüfparameter auf die Prüfergebnisse untersucht werden. Die Präzision des Prüfverfahrens „Schichtenverbund nach LEUTNER“ wird im Rahmen einer Ringanalyse ermittelt.

Zweites Ziel der Forschungsarbeit ist die Sammlung von Daten zur Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für die Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER. Grundlage bilden die Untersuchungsergebnisse an Bohrkernen aus 31 grunderneueren bzw. neu gebauten Strecken mit den derzeit gebräuchlichsten Straßenaufbauten. Insgesamt werden ca. 500 Bohrkernkerne hinsichtlich ihres Schichtenverbundes zwischen Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht, Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht sowie bei zweilagigem Einbau zwischen den Asphalttragschichten untersucht. An einem Teil der Bohrkernkerne werden anschließend die Oberflächenstrukturen der Schichtgrenzen analysiert sowie die Asphaltkenndaten (Verdichtungsgrad, Bindemittelgehalt, Hohlraumgehalt etc.) bestimmt.

In einem weiteren Teil der Untersuchungen soll festgestellt werden, inwieweit die Prüfung an Bohrkernen sinnvoll ist, die aus Teilerneuerungsmaßnahmen entnommen werden. Problematisch ist hier die Kennzeichnung der Schichtgrenzen bei gefräster Unterlage. Eine systematische Untersuchung über den Einfluß von Fräsarbeiten (Verlauf, Tiefe und Abstände der Fräsrillen) auf die Verbundeigenschaften der Asphaltbefestigung ist jedoch nicht das Ziel dieser Arbeit.

Zur Klärung, ob die Bohrkernentnahme grundsätzlich vor oder nach der Verkehrsübergabe stattfinden sollte, werden bei einem Teil der Strecken nach einem Jahr Verkehrs-

belastung erneut Bohrkerne entnommen und der Schichtenverbund geprüft. Tendenziell können Aussagen zu einer zeitlichen Entwicklung des Schichtenverbundes getroffen werden.

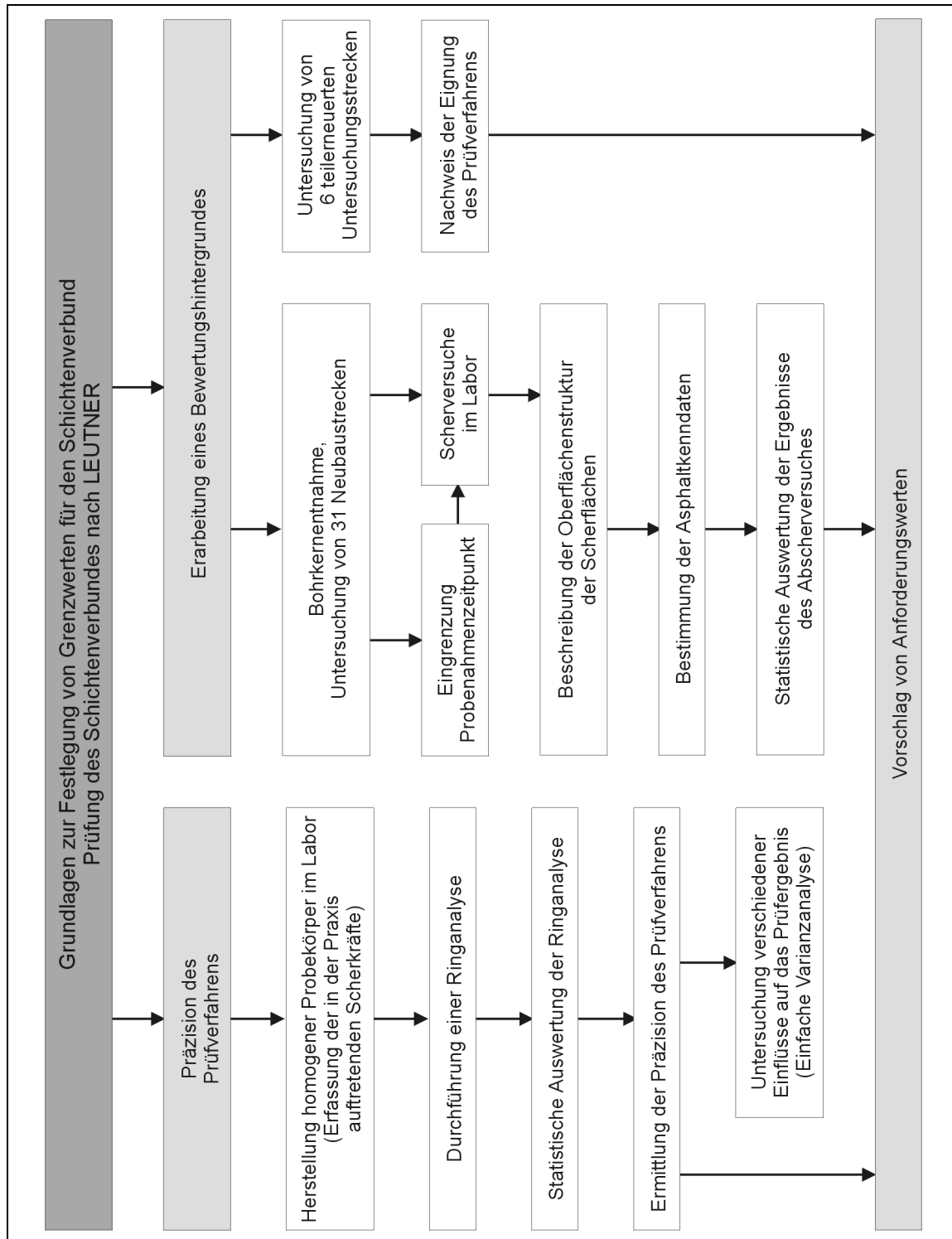


Abbildung 4-1: Methodische Vorgehensweise

## 4.2 Untersuchungen zur Präzision des Verfahrens

### 4.2.1 Allgemeines

Bei der Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER ist das Prüfergebnis von zahlreichen Einflüssen abhängig. Zu ihnen gehören das Prüfgerät selbst, der Einfluß des Laboranten, die Prüftemperatur und Einflüsse, die aus Einbaubedingungen und Bohrkernentnahme resultieren. Weiterhin hängt der Prüffehler von der Beschaffenheit der Schichtgrenze ab. Hierzu zählen die Rauheit der Oberfläche, das Größtkorn, der Bindemittelgehalt und andere Asphaltkennndaten.

Einen Prüffehler zu definieren, der all diese Einflußgrößen erfaßt, ist kaum möglich. Allein die Nachstellung aller in der Praxis auftretenden Verhältnisse in der Schichtgrenze würde einen kaum zu bewältigenden Probenumfang fordern, da gemäß ZTV Asphalt-StB (FGSV, 1998) und ZTVT-StB (FGSV, 1995) verschiedene Mischgutarten und -sorten gewählt werden können. Bei Betrachtung der in der Praxis am häufigsten gewählten Aufbauten sind bereits für die Asphaltdeck- und Binderschichten ca. 45 Varianten hinsichtlich Mischgutart und -sorte möglich. Hinzu kommen die gemäß Regelwerken zulässigen Bandbreiten in der Korngrößenverteilung, dem Bindemittelgehalt und der Bindemittelsorte.

Deshalb ist das Ziel der folgenden Untersuchungen, die Streuungen aus verschiedenen Meßgeräten zu erfassen und dabei zufallsbedingte Abweichungen der Meßwerte voneinander infolge auftretender Materialinhomogenitäten oder Randbedingungen bei der Entnahme der Proben zu vermeiden. Diese Vorgehensweise entspricht einer *Ab-schätzung* der Präzision des Prüfverfahrens. Aus diesen Überlegungen ergibt sich folgende Vorgehensweise:

1. In der Ringanalyse werden die Einflußgrößen Prüfgerät, Laborant und Prüftemperatur berücksichtigt.
2. Die Prüfung soll an homogenen, im Labor hergestellten Probekörpern durchgeführt werden, die die gesamte Bandbreite der in der Praxis auftretenden Scherkräfte widerspiegeln.
3. Die Auswertung der Meßergebnisse erfolgt nach dem Merkblatt über die statistische Auswertung von Ringanalysen – Teil 4 (FGSV, 1982).

#### 4.2.2 Herstellung homogener Probekörper

Die Ergebnisse umfangreicher Voruntersuchungen (WOLF, 1999) haben gezeigt, daß zweilagige Asphaltprobekörper (1. Lage 8 cm, 2. Lage 4 cm) für die Untersuchungen am besten geeignet sind. Die Herstellung erfolgte mit Hilfe selbst hergestellter Stahlformen in einer Druckprüfmaschine bei 135°C. Durch eine konstante Lastaufbringung von 300 bis 350 kN konnte die Mischgutverdichtung gewährleistet werden. Die Oberflächentemperatur der 1. Lage betrug  $75 \pm 2^\circ\text{C}$  beim Einbau der 2. Asphaltlage.

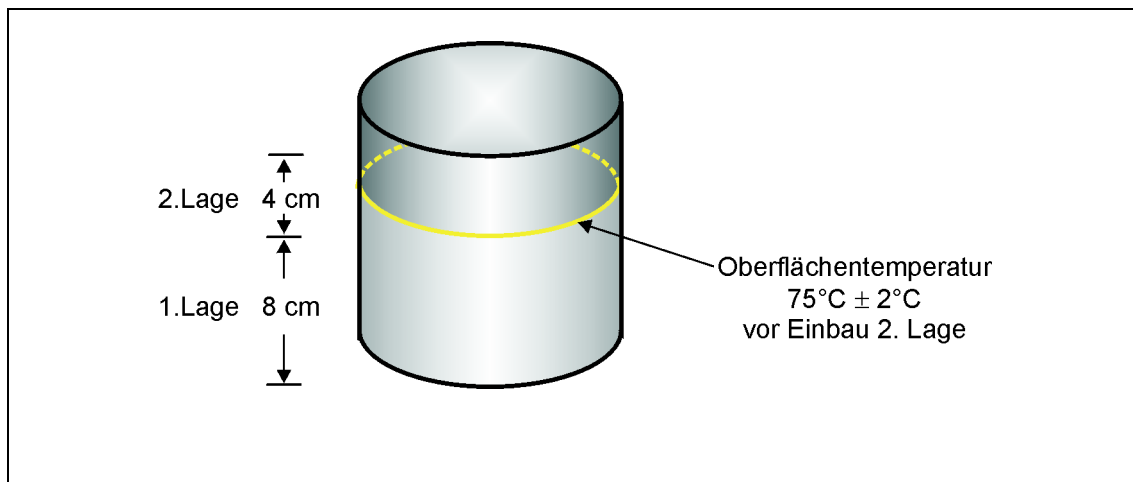


Abbildung 4-2: Herstellung von Asphaltprobekörpern

Dies wurde durch ständige Kontrollmessungen überprüft. Mit Hilfe der Druckprüfmaschine konnten die Probekörper nach Abkühlung ausgeformt werden. Die zweilagigen Probekörper wiesen eine Gesamthöhe von 12 cm und einen Durchmesser von  $151 \pm 2$  mm auf (Abbildung 4-2). Es wurden zwei Probekörpertypen hergestellt:

- Asphaltbeton 0/5 auf Asphaltbeton 0/5
- Asphaltbinder 0/16 auf Asphalttragschicht 0/32<sup>2</sup>.

Damit wird das Spektrum der eingangs erwähnten Variantenvielfalt nach oben und unten abgegrenzt.

---

<sup>2</sup> Die Herstellung von zweilagigen Probekörpern aus Asphalttragschicht 0/32 auf Asphalttragschicht 0/32 war nicht möglich. Derartige Probekörper zeigten nach dem Ausformen bei niedrig gewählter Verdichtung keine Festigkeit.



### 4.2.3 Festlegung der Meßbereiche

Die Probekörper sollten Scherkräfte in der Schichtgrenze aufweisen, die der Bandbreite der praktisch möglichen Meßergebnisse entsprechen. HIERSCHE u.a. (1983) stellt aufgrund von Ergebnissen eines Forschungsprojektes fest, daß der Schichtenverbund auch durch den Verdichtungsgrad der Schichten beeinflusst wird. Vorversuche haben bestätigt, daß in Abhängigkeit von der Variation des Verdichtungsgrades der Schichten unterschiedliche Scherkräfte in der Schichtgrenze auftreten. Dabei wurden die Verdichtungsgrade so gewählt, daß die erforderliche Bandbreite von Meßergebnissen erfaßt wurde. Tabelle 4-1 zeigt die festgelegten Bereiche für die spätere Herstellung der Probekörper für die Ringanalyse.

Tabelle 4-1: Festlegung der Meßbereiche

Meßbereich	Verdichtungs- grad [%]	Oberflächentemperatur bei Herstellung [°C]	Scherkraft- bereiche [kN]	
<b>I</b>	80	75	<b>&lt; 15</b>	AB 0/5 auf AB 0/5
<b>II</b>	90	75	<b>20 - 30</b>	
<b>III</b>	97	75	<b>30 - 40</b>	
<b>IV</b>	100	75	<b>&gt; 40</b>	
<b>V</b>	90	75	<b>15 - 25</b>	ABI 0/16 auf ATS 0/32
<b>VI</b>	95	75	<b>25 - 35</b>	

### 4.2.4 Untersuchungen zur Homogenität der Probekörper innerhalb der Meßbereiche

Die hergestellten Probekörper sollen homogen sein, um Schwankungen aus der Materialbeschaffenheit nahezu ausschließen zu können. An je drei hergestellten Probekörpern pro Meßbereich wurde die Homogenität der Probekörper durch

- die Raumdichte an den hergestellten Schichten
  - den Hohlraumgehalt an den hergestellten Schichten
  - den Oberflächenzustand der Schichtgrenze - Ober- und Unterseite - (Sandpatch, Skid Resistance Tester und Ausflußmesser gemäß FGSV-Arbeitsanleitung)
  - die Prüfung auf Kornzertrümmerung durch den Herstellungsprozeß
- untersucht und nachgewiesen.

#### 4.2.5 Planung und Durchführung der Ringanalyse

Gemäß dem Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen (Teil 3) (FGSV, 1982) müssen mindestens 12 Prüfstellen an einer Ringanalyse teilnehmen, um den Prüffehler ermitteln zu können. In Zusammenarbeit mit dem FGSV Arbeitskreis 7.3.8 „Laboriumstechnik“ erklärten sich 14 Prüfstellen bereit, an dieser Ringanalyse mitzuwirken. Die Prüfstellen sind in Anlage 1.2 aufgeführt. Mit den Probekörpern erhielten die Prüfstellen eine Arbeitsanleitung und ein Begleitprotokoll (Anlage 1.3), in dem u.a. Angaben zum Schergerät und der Häufigkeit der Durchführung der Prüfung abgefragt wurden. Im Vorfeld der Organisation der Ringanalyse zeigte sich, daß die teilnehmenden Prüfstellen mit unterschiedlichen Schergeräten arbeiten. Aus diesem Grund wurde von dem Schergerät nach LEUTNER der Versuchsanstalt eine technische Zeichnung angefertigt und jeder Prüfstelle zum Vergleich mit dem eigenen Gerät zugesandt. Hintergrund dieser Erfassung ist die Überprüfung, inwieweit Abweichungen der Geräte untereinander Einfluß auf die Ergebnisse zeigen.

Pro Meßbereich und Prüfstelle mußten insgesamt vier Probekörper geprüft werden (2 x 2 Probekörper für die Erfassung der Wiederholstandardabweichung). Dies ergab einen Umfang von 24 Probekörpern je Prüfstelle. Die Probekörper wurden hergestellt, innerhalb jedes Meßbereiches nach dem Zufallsprinzip ausgewählt und numeriert. Um eine homogene Herstellung zu gewährleisten, wurden die Probekörper von drei Mitarbeitern (pro Mitarbeiter jeweils Probekörper zweier Meßbereiche) hergestellt. Dies ergab eine Gesamtanzahl von 336 Probekörpern. Die Anzahl der Probekörper je Prüfstelle ist in Tabelle 4-2 enthalten.

Tabelle 4-2: Anzahl der Probekörper

AB 0/5 auf AB 0/5			ABi 0/16 auf ATS 0/32		
Meßbereich [kN]		Anzahl PK	Meßbereich [kN]		Anzahl PK
I	< 15	4	V	15 - 25	4
II	20 - 30	4	VI	25 - 35	4
III	30 - 40	4	<b>Σ 8 PK</b>		
IV	> 40	4			
		<b>Σ 16 PK</b>			

Anschließend wurden jeder Prüfstelle die Probekörper angeliefert. Die Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER erfolgte gemäß Arbeitsanleitung (FGSV, 1999), d.h., bei einer Prüftemperatur von  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  und einer Vorschubgeschwindigkeit von

50 ± 3 mm/min. Die Ergebnisse der Scherkraft und des dazugehörigen Scherweges wurden der Versuchsanstalt zugeschickt.

#### 4.2.6 Ermittlung der Prüftoleranz unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen

Die Auswertung der Ringanalyse erfolgt gemäß „Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 1 bis 4“ (FGSV, 1982 - 2000). Es werden die beiden Fälle *Wiederholbedingungen* und *Vergleichbedingungen* betrachtet, die gemäß Merkblatt wie folgt definiert werden:

Unter Wiederholbedingungen versteht man, daß mit demselben Verfahren an identischen Objekten am selben Ort (Labor) durch denselben Bearbeiter mit derselben Geräteausrüstung voneinander unabhängige Ermittlungsergebnisse erfaßt werden.

Vergleichbedingungen sind dann gegeben, wenn mit demselben Verfahren an identischem Material an verschiedenen Orten (verschiedene Labors) von verschiedenen Bearbeitern mit verschiedener Geräteausrüstung Ermittlungsergebnisse erfaßt werden.

Dementsprechend sind die Untersuchungen zur Präzision in die zwei Bearbeitungsstufen

- Ermittlung der Prüftoleranz unter Wiederholbedingungen und
  - Ermittlung der Prüftoleranz unter Vergleichbedingungen
- unterteilt.

Grundlage der statistischen Auswertung bildet gemäß o.g. Merkblatt ein Stufenmodell mit drei Zufallskomponenten. In diesem Modell stellt jeder Einzelwert die Summe von vier Größen dar:

$$x = \mu_G + \Delta x_L + \Delta x_E + \Delta x_a$$

- mit:
- |              |   |  |
|--------------|---|--|
| $x$          | - | Einzelwert   |
| $\mu_G$      | - | Gesamtmittelwert   |
| $\Delta x_L$ | - | Prüfstellenbedingte Zufallsabweichung. Ihre Varianz $\sigma_L^2$ wird als Prüfstellenvarianz bezeichnet  |
| $\Delta x_E$ | - | Zufällige, in jedem Versuch auftretende Ergebnisabweichung. Ihre Varianz $\sigma_E^2$ wird als Ergebnisvarianz bezeichnet.                     |
| $\Delta x_a$ | - | Zufallsabweichung vom Gesamtmittelwert infolge der Streuung der Einzelwerte. Ihre Varianz $\sigma_a^2$ wird als Bestimmungsvarianz bezeichnet. |

Zwischen den Varianzen des Modells (von Einzelwerten, unter Wiederholbedingungen und Vergleichbedingungen) bestehen folgende Beziehungen:

Standardabweichung unter Wiederholbedingungen  $\sigma_r$ :

$$\sigma_r^2 = \sigma_E^2 + \frac{\sigma_a^2}{m}$$

m - geforderte Anzahl von Einzelwerten

Standardabweichung unter Vergleichbedingungen  $\sigma_R$ :

$$\sigma_R^2 = \sigma_r^2 + \sigma_L^2$$

Wiederholbarkeit r:

$$r = 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_r = 2,77 \cdot \sigma_r$$

Vergleichbarkeit R:

$$R = 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_L^2} = 2,77 \cdot \sigma_R$$

Der Wert 1,96 (Faktor f) ergibt sich mit der vorgegebenen statistischen Sicherheit von 95 % unter der Annahme, daß  $\Delta x_L$  und  $\Delta x_E$  normalverteilt sind.

Zulässige Spannweite für Einzelwerte:

$$d_a = W_P(m) \cdot \sigma_a$$

Der Faktor  $W_P$  beträgt für eine Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % bei einer geforderten Anzahl an Einzelbestimmungen von  $m = 2$  gemäß Merkblatt 2,77.

#### **4.2.7 Untersuchung des Einflusses einzelner Randbedingungen auf die Meßergebnisse**

Bei der Ermittlung der Präzision des Prüfverfahrens zur Erfassung des Schichtenverbundes nach LEUTNER muß festgehalten werden, daß möglicherweise einzelne Randbedingungen der Prüfung Einfluß auf das Prüfergebnis haben. Im Rahmen der Ringanalyse wurde mit unterschiedlichen Pressetypen und Schergeräten verschiedener Hersteller gearbeitet. Auf Grundlage der Ergebnisse und des Datenmaterials der durchgeführten Ringanalyse soll geprüft werden, inwieweit einzelne Randparameter der Prüfung einen signifikanten Einfluß auf das Meßergebnis zeigen. Folgende Einflußgrößen wurden dabei als Kriterien ausgewählt:

- Pressetyp mit maximaler Scherkraft von 50 und 100 kN,
- Abmessungen des Schergerätes,
- die Häufigkeit der durchgeführten Messungen.

Es wurden Datensätze definiert und mittels einfacher Varianzanalyse auf Signifikanz geprüft. Die statistischen Untersuchungen wurden für die Ergebnisse eines Meßbereiches (Scherkraft < 15 kN) durchgeführt. Grundsätzlich lassen sich mit dieser Vorge-

hensweise nur Tendenzen erkennen. Eine statistische Absicherung der Ergebnisse ist aufgrund des geringen Datenmaterials nicht möglich.

Eine weitere mögliche Einflußgröße auf das Prüfergebnis ist die Einhaltung der Vorschubgeschwindigkeit vor allem unter Last. Laut Arbeitsanleitung (FGSV, 1999) wird eine konstante Vorschubgeschwindigkeit von  $50 \pm 3$  mm/min gefordert. Bisher wurde nicht überprüft, ob diese Vorschubgeschwindigkeit eingehalten wird. Für die Überprüfung benötigen die Geräte einen Wegaufnehmer, der den Verlauf des Weges über der Prüfzeit aufzeigt. Bei konstantem Verlauf kann von der Einhaltung der konstanten Vorschubgeschwindigkeit ausgegangen werden. Für detaillierte Auswertungen ist die Ausstattung der Geräte mit einer Software sinnvoll, die die Aufzeichnung aller Meßdaten und anschließende Berechnung der Vorschubgeschwindigkeit über die Prüfdauer ermöglicht.

Zusätzlich wurden im Labor der Versuchsanstalt homogene zweilagige Probekörper (AB 0/5 auf AB 0/5) hergestellt und bei variierten Vorschubgeschwindigkeiten von 35 mm/min bis 50 mm/min abgeschert. Die auf diese Weise ermittelten Scherkräfte sollen einen möglichen Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit auf das Prüfergebnis zeigen.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, Voraussetzungen für die Normung der Geräte zu benennen, d.h. die Streuung der Geräte und technischen Möglichkeiten zu erfassen.

### **4.3 Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes**

#### **4.3.1 Auswahl und Beschreibung der untersuchten Strecken**

Für die Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes wurden aus insgesamt 31 Strecken mit Grunderneuerung oder Neubaustrecken Bohrkern entnommen und im Labor der Versuchsanstalt der Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER unterzogen. Die Baumaßnahmen wurden durch die Straßenbauverwaltungen der Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Thüringen und Bayern bereit gestellt (Anlage 2.2). Dabei wurden die derzeit ausgeführten Aufbauten ausgewählt. Bei den Deckschichtarten handelt es sich um Splittmastixasphalt und Asphaltbeton. Gußasphalt wurde nicht in die Untersuchungen einbezogen, da aufgrund der Einbaubedingungen und der Mischgutzusammensetzung keine Probleme hinsichtlich des Schichtenverbundes zu erwarten waren. Bei den dargestellten Baumaßnahmen mit Gußasphalt als Deckschicht erfolgte die Bohrkernentnahme stets vor Einbau des Gußasphaltes. Insgesamt wurde der Schichtenverbund von 31 Strecken hinsichtlich der Schichtgrenze:

- Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht
- Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht
- Asphalttragschicht – Asphalttragschicht (bei zweilagigem Einbau)

untersucht.

Informationen zu Einbaubedingungen und Bauablauf der Baumaßnahmen lieferten die zuständigen Straßenbauverwaltungen in einem Fragebogen (Anlage 2.1). Demnach handelt es sich bei den untersuchten Baumaßnahmen um Standardbauweisen gemäß RStO 86/89 (Abbildung 4-4). Als Anspritzmittel wurde i.d.R. Haftkleber verwendet.

Um den Einfluß von verschiedenen Bohrkerngeräten und des Bedienungspersonals zu minimieren, wurden alle Bohrkern von einer Straßenbaufirma entnommen. Die Entnahme der Bohrkern erfolgte stets vor der Verkehrsübergabe in den Jahren 1998 und 1999.

Pro Baumaßnahme wurden insgesamt 16 Bohrkern von vier Profilen entnommen. Je Profil wurden zwei Bohrkern in der rechten Rollspur und zwei Bohrkern in der Fahrstreifenmitte entnommen. Der Abstand zwischen den Profilen war je nach Länge der Baumaßnahme variabel (Abbildung 4-3).

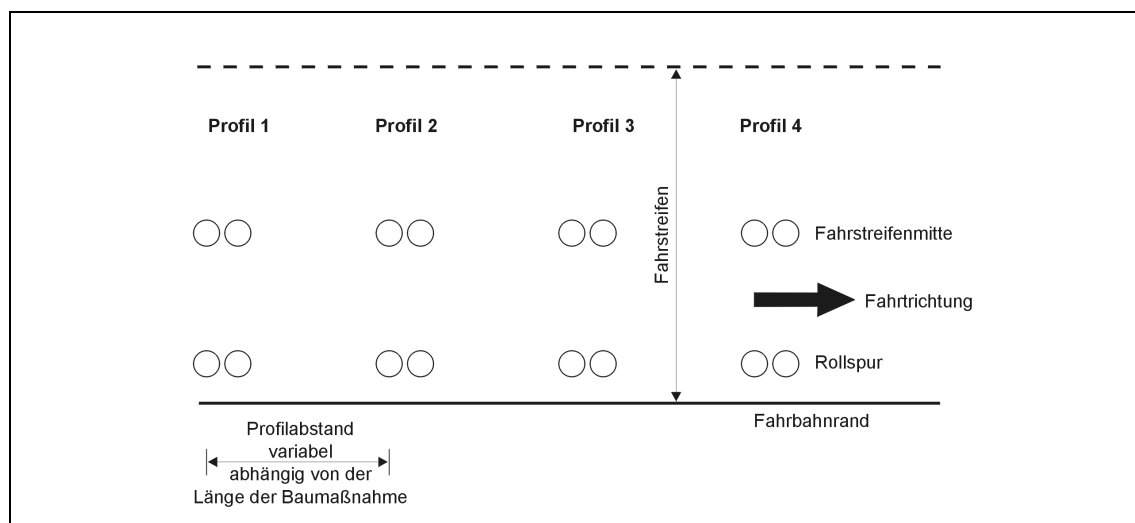


Abbildung 4-3: Stationierung der Profile zur Bohrkernentnahme

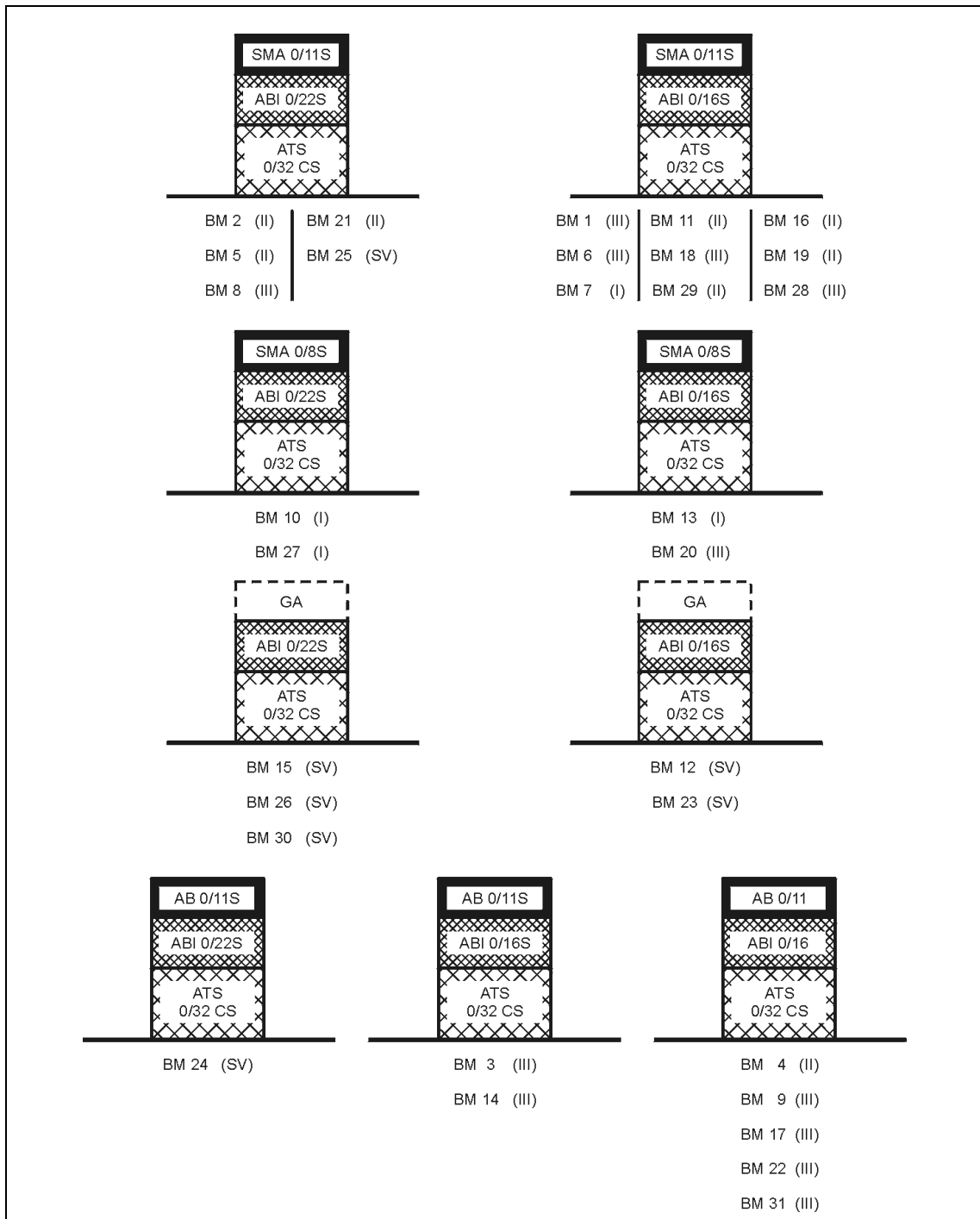


Abbildung 4-4: Aufbauten der untersuchten Strecken

## 4.3.2 Laboruntersuchungen

### 4.3.2.1 Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER

Die entnommenen Bohrkerne wurden gemäß Arbeitsanleitung (FGSV, 1999) abgeschert. Vor der Prüfung des Schichtenverbundes wurden die jeweiligen Schichtdicken gemäß der „Technischen Prüfvorschrift zur Bestimmung der Dicken von Oberbauschichten im Straßenbau (TPD-StB 89)“ (FGSV, 1989) ermittelt. Anschließend wurden

die Schichtgrenzen markiert. Um zusätzliche Streuungen der Meßergebnisse zu vermeiden, erfolgte die Markierung der Schichtgrenzen und Prüfung des Schichtenverbundes durch denselben Bearbeiter.

### **Ermittlung des Scherweges**

Gemäß Arbeitsanleitung (FGSV,1999) bildet das aufgezeichnete Kraft-Weg-Diagramm die Grundlage der Versuchsauswertung. Das Maximum der Scherkraft stellt den Bruchzustand dar. Zur Ermittlung des Scherweges ist an den Wendepunkt der Kraft-Weg-Kurve eine Tangente anzulegen und der Schnittpunkt zwischen Tangente und Abszisse zu ermitteln. Der Scherweg ist dann die Differenz zwischen diesem Schnittpunkt und dem Ende des Scherweges, der durch die Maximalkraft  $F_{\max}$  bestimmt wird. Nach GRÄTZ (1983) und CODJIA (1994) kann anhand folgender Modellfunktion der Kurvenverlauf beschrieben werden:

$$y = a \cdot w^b \cdot e^{c \cdot w}$$

mit:     y         = Meßwert der Scherkraft  
         w         = Meßwert des Scherweges  
         a,b,c     = Parameter, die den Kurvenverlauf beeinflussen.

Mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes wurde dieser Regressionsansatz (Modellfunktion) nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate nach GAUß den empirisch erfaßten Daten des Kraft-Weg-Verlaufes angepaßt. Anschließend war es möglich, den Wendepunkt dieser Modellfunktion  $f_m(x)$  durch die Bildung der zweiten Ableitung ( $f_m''(x)$ ) zu bestimmen und eine Tangente an den Wendepunkt anzulegen. Es wurde der Schnittpunkt der Tangente mit der Abszisse berechnet  $f_m''(x) = 0$  (Abbildung 4-5). Gemäß Arbeitsanleitung (FGSV, 1999) stellt der Schnittpunkt zwischen Tangente und Weg-Achse den Nullpunkt für die Wegmessung dar.



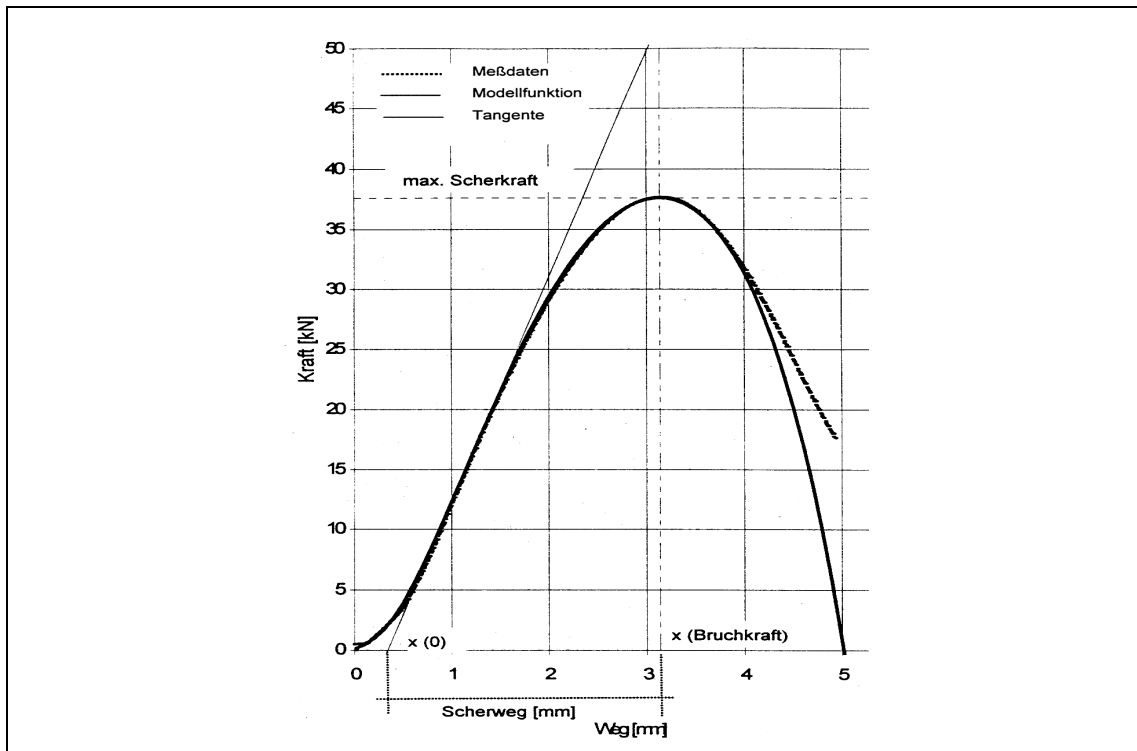


Abbildung 4-5: Ermittlung des Scherweges mittels Regressionsansatz

Die äußere Beschaffenheit der Bohrkerne ist festzuhalten. Hierzu wurden die einzelnen Schichten der Bohrkerne hinsichtlich Inhomogenitäten (Fehlstellen durch Entmischung, verwitterte oder mörtelfreie Anteile der Mineralstoffe, ungenügende Verdichtung, Rißbildung, Kornausbrüche und Verschmutzung) visuell beurteilt. Der Durchmesser des Bohrkernes sowie die Gleichmäßigkeit des Durchmessers über die Bohrkernlänge wurde erfaßt.

#### 4.3.2.2 Beschreibung der Oberflächenstruktur der Schichtgrenzen

Die Schichtgrenzen aller Bohrkerne wurden untersucht. Dabei wurde sowohl die Schichtgrenze der zu überbauenden Schicht als auch die Unterseite der aufgetragenen Schicht fotografiert und analysiert.

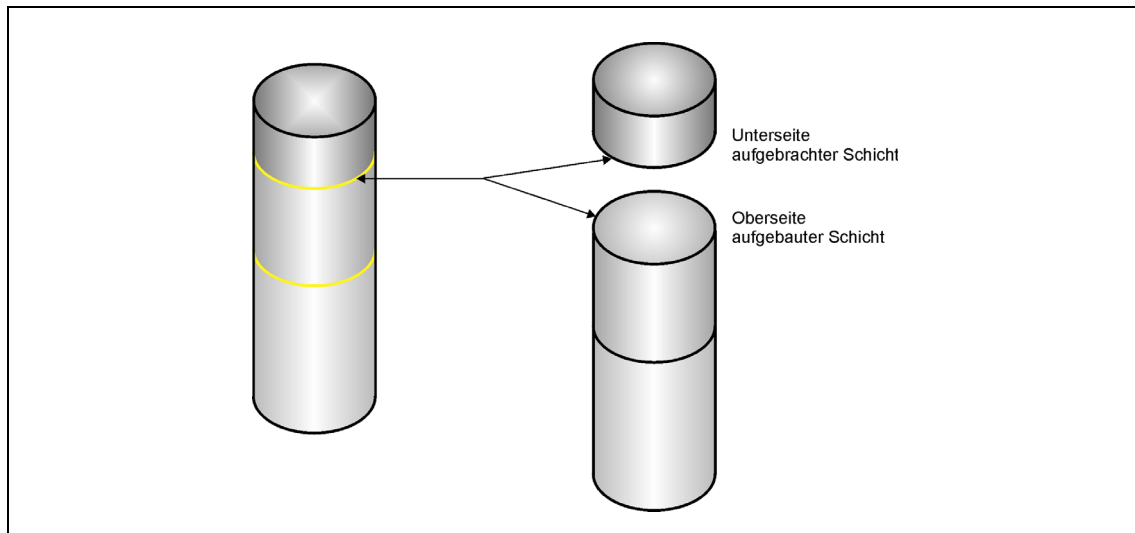


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der untersuchten Schichtgrenzen

Die Beschreibung der Oberflächenstrukturen erfolgte nach den im Arbeitspapier Schichtenverbund (FGSV, 1995) und in der Arbeitsanleitung (FGSV, 1999) aufgeführten Kriterien:

- Struktur grob / fein
- Fehlstellen / Entmischungen
- verwitterte / mörtelfreie Anteile des Mineralstoffes
- ungenügende Verdichtung
- Schmutz
- Lage der Trennflächen
- Haftkleber (Oberfläche matt / glänzend).

Für die Beurteilung der Kriterien *Struktur* und *Haftklebermenge* wurde ein Bewertungsschema entworfen. Die Beurteilung der Oberflächen erfolgte immer durch dieselben Bearbeiter. Neben der Beurteilung der genannten Kriterien wurde stichprobenartig bei jeder Baumaßnahme und Schichtgrenze die Rauhtiefe der Grenzflächen mittels Sandpatchmethode bestimmt.

#### 4.3.2.3 Asphaltuntersuchungen

Zwei der insgesamt vier Bohrkerns jedes Profils (8 Bohrkerns pro Baumaßnahme) wurden gemäß ZTV Asphalt-StB 94/98 (FGSV, 1998) bzw. ZTVT-StB 95 (FGSV, 1995) einer Kontrollprüfung (jedoch an wiedererwärmten Mischgut) unterzogen. Folgende Asphaltkenndaten wurden bestimmt:

- Verdichtungsgrad
- Hohlraumgehalt
- Bindemittelgehalt
- Korngrößenverteilung
- Erweichungspunkt Ring und Kugel.

Anhand einzelner ausgewählter Baumaßnahmen (niedrige und hohe Scherkräfte) wurden exemplarisch die ermittelten Oberflächen- und Asphaltkenndaten in Abhängigkeit von den Scherkräften untersucht.

#### **4.3.3 Auswertung der Ergebnisse und Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes**

Grundlage der statistischen Auswertung bilden die Ergebnisse der Prüfung des Schichtenverbundes von insgesamt 31 untersuchten Strecken. Dabei wird zwischen den Schichtgrenzen

- Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht
- Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht
- Asphalttragschicht – Asphalttragschicht

unterschieden.

Nullwerte (kein Schichtenverbund bei Bohrkernentnahme) wurden nicht in die Auswertung einbezogen. Im Kapitel „Analyse zur Qualität des Schichtenverbundes“ wird u.a. auf Strecken mit fehlendem Schichtenverbund und die möglichen Ursachen eingegangen.

Erster Schritt der statistischen Auswertung ist die Eliminierung von Ausreißern. Nach SACHS (1992) kann bei großem Stichprobenumfang folgender Prüfwert zur Ausreißerprüfung herangezogen werden:

$$T_1 = \left| \frac{x_1 - \bar{x}}{s} \right|$$

mit:  $x_1$  - mutmaßlicher Ausreißer  
 $\bar{x}$  - Mittelwert  
 $s$  - Standardabweichung

Der Prüfwert  $T_1$  wird mit dem Schwellenwert für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 95 % verglichen. Überschreitet der Prüfwert den Schwellenwert, so handelt es sich um einen Ausreißer. Dieser Wert wird in die nachfolgenden Untersuchungen nicht mehr mit einbezogen.

Zur Einschätzung des Meßdatenkollektives wurden anschließend gebräuchliche Kennziffern der beschreibenden Statistik ermittelt. Dazu gehört das arithmetische Mittel und der Median. Der Median ist der „mittlere Wert“, über dem genauso viele Meßwerte darüber wie darunter liegen (FGSV, 1982). Der Modus ist der am häufigsten vorkommende Einzelwert bzw. die am meisten Werte enthaltende Klasse bei klassierten Werten.

Zur Kennzeichnung der Streuung der Einzelwerte um das arithmetische Mittel wurde die Standardabweichung ermittelt. Aussage über die Symmetrie der Meßdaten liefert die Schiefe, die bei exakt symmetrischer Verteilung der Meßdaten den Wert Null aufweist.

Für die Aufstellung des Bewertungshintergrundes wurden die Summenhäufigkeiten der ermittelten Scherkräfte bzw. Scherwege herangezogen. Um den Bewertungshintergrund zu verifizieren, wurden 300 bis 350 zusätzliche Daten für jede Schichtgrenze aus dem Forschungsbericht der Universität Karlsruhe (CODJIA, 1994) und dem Westfälischen Prüfamts für Baugrund und Straßenbaustoffe Münster ausgewertet.

#### 4.4 Zusätzliche Untersuchungen

##### 4.4.1 Untersuchung der zeitlichen Entwicklung des Schichtenverbundes

An sechs der insgesamt 31 untersuchten Strecken wurden ein Jahr nach der Verkehrsübergabe erneut Bohrkerne entnommen und auf Schichtenverbund geprüft. Auf diese Weise kann eine Aussage zum Probenahmenzeitpunkt getroffen werden und die zeitliche Entwicklung tendenziell erfaßt werden. Abbildung 4-7 zeigt das Entnahmeprofil.

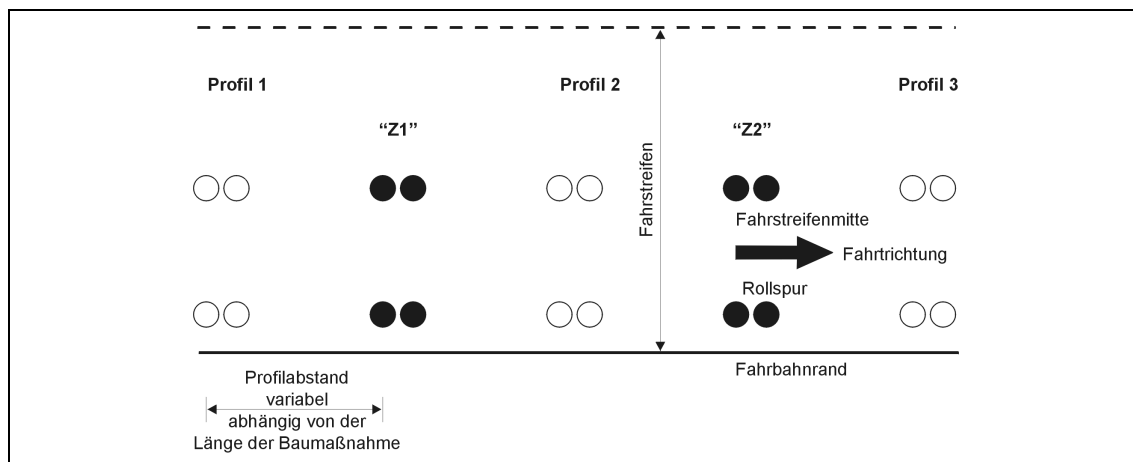


Abbildung 4-7: Entnahmeprofile „Z1“ und „Z2“ zur Untersuchung der zeitlichen Entwicklung des Schichtenverbundes

Insgesamt wurden acht Bohrkerne pro Strecke entnommen. Die Profile für die Untersuchung der zeitlichen Entwicklung („Z1“ und „Z2“) wurden zwischen den Profilen 1 und 2 sowie den Profilen 2 und 3 der Erstentnahme stationiert.

#### **4.4.2 Strecken mit Teilerneuerung**

An insgesamt sieben Strecken mit Teilerneuerung wurden Bohrkerne entnommen und der Schichtenverbund nach LEUTNER geprüft. Auf diese Weise sollte untersucht werden, ob das Prüfverfahren auch für die Prüfung von Bohrkernen geeignet ist, die aus Strecken mit gefräster Unterlage oder Überbauungen entnommen wurden. Analog zu den bisher geschilderten Bohrkernentnahmen wurden auch hier Proben in der rechten Rollspur und in der Fahrstreifenmitte entnommen. Insgesamt wurden acht Bohrkerne pro Strecke entnommen. Die Bohrkerne waren in Fahrtrichtung abzuscheren. Die Fahrtrichtung wurde vor der Entnahme markiert.

## **5 Abschätzung der Präzision des Prüfverfahrens „Schichtenverbund nach LEUTNER“**

### **5.1 Festlegung der Meßbereiche**

Die im Labor hergestellten zweilagigen Asphaltprobekörper mit einem Durchmesser von 150 mm sollten Scherkräfte aufweisen, die der Bandbreite der in der Praxis auftretenden Scherkräfte entsprechen. Dazu wurden die Verdichtungsgrade der oberen und unteren Lage variiert, wobei beide Asphaltlagen die gleiche Verdichtung aufwiesen. In der Tabelle 5-1 sind die in den Vorversuchen ermittelten Scherkräfte der hergestellten Probekörper in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad aufgeführt. Die hier gewählten Verdichtungsgrade sind nur bedingt mit denen der Praxis vergleichbar. Da das Ziel die Variation der Scherkräfte war, mußten teilweise sehr niedrige Verdichtungsgrade für niedrige Scherkräfte gewählt werden.

Tabelle 5-1: Ermittelte Scherkräfte in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

AB 0/5 auf AB 0/5		ABI 0/16 auf ATS 0/32	
Verdichtungs- grad [%]	Scherkraft [kN]	Verdichtungs- grad [%]	Scherkraft [kN]
80	11,3	80	5,6
	11,0		8,4
	10,8		8,3
	12,2		9,5
	11,7		9,7
	12,4		8,2
90	20,6	90	23,2
	20,0		21,2
	21,1		14,9
	22,8		22,3
	22,2		18,6
	20,8		21,4
97	36,2	95	29,3
	34,0		32,3
	33,1		27,9
	32,7		34,5
	30,5		33,4
	30,2		26,5
100	42,2	100	38,8
	42,1		39,5
	40,1		43,8
	46,0		37,2
	43,8		41,8
	44,2		47,5

Die Probekörper aus Asphaltbinder 0/16 auf Asphalttragschicht 0/32 konnten bei einer Verdichtung von 80 % vereinzelt nur zerbrochen aus der Herstellungsform entnommen werden. Für die weiteren Untersuchungen werden für diese Bauweise die Meßbereiche V und VI bei 90 und 95 % Verdichtung gewählt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Die Scherkräfte, die bei einer Verdichtung von 100 % ermittelt wurden, liegen teilweise weit über den in der Praxis zu erwartenden Werten.

Für die zweilagigen Probekörper Asphaltbeton 0/5 auf Asphaltbeton 0/5 werden alle vier Meßbereiche (I bis IV) in das weitere Untersuchungsprogramm (Ringanalyse) aufgenommen. Tabelle 5-2 zeigt die festgelegten Bereiche für die spätere Herstellung der Probekörper für die Ringanalyse.

Tabelle 5-2: Festlegung der Meßbereiche

Meßbereich	Verdichtungsgrad [%]	Scherkraft-bereiche [kN]	
<b>I</b>	80	<b>&lt; 15</b>	AB 0/5 auf AB 0/5
<b>II</b>	90	<b>20 - 30</b>	
<b>III</b>	97	<b>30 - 40</b>	
<b>IV</b>	100	<b>&gt; 40</b>	
<b>V</b>	90	<b>15 - 25</b>	ABI 0/16 auf ATS 0/32
<b>VI</b>	95	<b>25 - 35</b>	

Die Schichtgrenzen der im Labor hergestellten Probekörper waren gut erkennbar. Die Schichtdicke beträgt durch die labortechnische Herstellung einheitlich 4 cm.

## 5.2 Untersuchungen zur Homogenität der Probekörper innerhalb der Meßbereiche

Um Schwankungen der Scherkräfte, die aus der Materialbeschaffenheit resultieren können, nahezu auszuschließen, müssen die Probekörper homogen sein. Die Homogenität innerhalb der gewählten Meßbereiche wurde mit Hilfe der Asphaltkenndaten Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad untersucht. Die ermittelten Kenn-daten sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefaßt.

Anhand der Ergebnisse der Probekörper AB 0/5 auf AB 0/5 (Tabelle 5-3) wird deutlich, daß innerhalb der Meßbereiche nahezu gleiche Ergebnisse auftreten, so daß von einer Herstellung "gleichartiger" Probekörper ausgegangen werden kann. Es bleibt jedoch darauf hinzuweisen, daß die Verdichtungsgrade der Marshall-Probekörper aus den Voruntersuchungen zur Bestimmung der Einwaage für die Herstellung der Probekörper in der Druckprüfmaschine im Meßbereich III und IV etwas niedriger sind als die später hergestellten Probekörper für die Prüfung des Schichtenverbundes. Dies ist jedoch von untergeordneter Bedeutung, da die Probekörper innerhalb eines Meßbereiches gleiche Kenndaten aufweisen.

Tabelle 5-3: Untersuchungen der Asphaltprobekörper an den hergestellten Schichten AB 0/5 auf AB 0/5

Meßbereich	Soll Verdichtung (Schichtdicke)	Raumdichte $\rho_A$ [g/cm³]	Hohlraumgehalt $H_{bit}$ [Vol.-%]	Verdichtungsgrad $k$ [%]
I	80 % [4 cm]	1,864	22,1	79,6
		1,857	22,4	79,3
		1,857	22,4	79,3
I	80 % [8 cm]	1,875	21,6	80,0
		1,863	22,1	79,5
		1,866	22,0	79,6
II	90 % [4 cm]	2,097	12,4	89,5
		2,104	12,1	89,8
		2,106	12,0	89,9
II	90 % [8 cm]	2,106	12,0	89,9
		2,105	12,0	89,8
		2,102	12,2	89,7
III	97 % [4 cm]	2,230	6,8	95,2
		2,226	7,0	95,0
		2,234	6,6	95,3
III	97 % [8 cm]	2,238	6,5	95,5
		2,231	6,8	95,2
		2,244	6,2	95,8
IV	100 % [4 cm]	2,284	4,6	97,5
		2,288	4,4	97,7
		2,278	4,8	97,2
IV	100 % [8 cm]	2,291	4,3	97,8
		2,293	4,2	97,9
		2,287	4,4	97,6

Die Ergebnisse der zweischichtigen Probekörper Asphaltbinder 0/16 auf Asphalttragschicht 0/32 sind in Tabelle 5-4 dargestellt. Die obere Schicht (ABI 0/16) zeigt ähnlich wie die Probekörper aus Asphaltbeton 0/5 nur geringe Streuungen innerhalb eines Meßbereiches. Die Asphalttragschicht 0/32 weist dagegen erwartungsgemäß höhere Streuungen in den Asphaltkenndaten auf. Die Herstellung einer vergleichbaren Homogenität mit den Probekörpern aus Asphaltbeton 0/5 kann von diesem grobkörnigen Material nicht erwartet werden. Dennoch erfolgte die labortechische Herstellung unter stetig kontrollierten Randbedingungen, so daß z.B. Temperaturschwankungen oder Entmischungen ausgeschlossen werden können.



Tabelle 5-4: Untersuchungen an den hergestellten Schichten ABI 0/16 auf ATS 0/32

Meßbereich	Soll Verdichtung (Schichtdicke)	Raumdicke $\rho_A$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Hohlraumgehalt $H_{bit}$ [Vol.-%]	Verdichtungsgrad $k$ [%]
<b>V</b>	90 % [4 cm] ABI 0/16	2,236	11,8	92,8
		2,234	11,9	92,7
		2,227	12,2	92,4
<b>V</b>	90 % [8 cm] ATS 0/32	2,350	9,5	95,6
		2,385	8,2	97,0
		2,362	9,0	96,0
<b>VI</b>	95 % [4 cm] ABI 0/16	2,289	9,8	95,0
		2,296	9,5	95,3
		2,287	9,8	95,0
<b>VI</b>	95 % [8 cm] ATS 0/32	2,409	7,2	98,0
		2,389	8,0	97,2
		2,401	7,5	97,7

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Untersuchungen der Oberflächeneigenschaften der Schichtgrenzen aufgeführt. Die Trennfläche und die Schichtgrenze waren immer identisch. Tabelle 5-5 zeigt die Oberflächenkennwerte der Schichtgrenze Asphaltbeton 0/5 auf Asphaltbeton 0/5 (Unterseite). Die Ergebnisse in jedem Meßbereich weisen ähnliche Werte auf. Das läßt darauf schließen, daß bezüglich der Oberflächenbeschaffenheit in den Schichtgrenzen innerhalb eines Meßbereiches keine Inhomogenitäten auftreten.

Tabelle 5-5: Oberflächencharakterisierung der Schichtgrenzen (AB 0/5 auf AB 0/5)

Meßbereich	Verdichtung [%]	SRT-Wert [-]	Ausflußmesser [s]	Rauhtiefe [mm]
<b>I</b>	<b>80</b>	86,4	2,5	0,11
		85,4	3,0	0,12
<b>II</b>	<b>90</b>	86,6	4,9	0,09
		89,2	5,3	0,09
<b>III</b>	<b>97</b>	86,4	6,4	0,08
		83,4	8,2	0,07
<b>IV</b>	<b>100</b>	82,6	8,3	0,07
		85,2	6,1	0,08

Der Vergleich der SRT-Werte untereinander zeigt, daß praktisch kaum Unterschiede auftreten. Die Ausflußzeiten nehmen mit zunehmendem Verdichtungsgrad erwartungs-

gemäß zu, da die Oberflächen eine höhere Mikrorauheit aufweisen. Die Oberflächen in der Schichtgrenze der Probekörper im Meßbereich I zeigen eine größere Rauhtiefe und damit größere Grobheit im Vergleich zu den übrigen Probekörpern. Insgesamt sind jedoch die Abweichungen der ermittelten Rauhtiefen aller Probekörper untereinander als sehr gering einzustufen.

Bei den zweilagigen Probekörpern aus Asphaltbinder 0/16 und Asphalttragschicht 0/32 wurden die Oberflächenmerkmale sowohl an der Unterseite der Scherfläche (ABI 0/16) als auch an der Oberseite (ATS 0/32) bestimmt. Tabelle 5-6 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 5-6: Oberflächencharakterisierung der Schichtgrenzen (ABI 0/16 auf ATS 0/32)

Meßbereich	Verdichtung [%]	SRT-Wert [-]		Ausflußmesser [s]	Rauhtiefe [mm]	
		ABI	ATS		ABI	ATS
<b>V</b>	<b>90</b>	77	84	--*	0,22	0,25
				--	0,18	0,31
		70	86	--	0,19	0,28
				--	0,21	0,24
<b>VI</b>	<b>95</b>	85	85	--	0,23	0,23
				--	0,20	0,25
		80	90	--	0,21	0,24
				--	0,18	0,27

\*: Ausflußzeit nicht mehr meßbar (gegen Null)

Die SRT-Werte sind im Meßbereich V etwas niedriger als im Meßbereich VI. Innerhalb der Meßbereiche treten annähernd gleiche Werte auf. Die Ausflußzeit konnte nicht mehr erfaßt werden. Sie ging bei allen Flächen aufgrund der groben Struktur gegen Null. Die ermittelten Rauhtiefen zeigen in beiden Meßbereichen Werte gleicher Größenordnung. Innerhalb der einzelnen Meßbereiche liegen sie dennoch dichter beieinander. Insgesamt kann aufgrund der Oberflächenmerkmale auch für die Probekörper aus Asphaltbinder 0/16 und Asphalttragschicht 0/32 CS festgehalten werden, daß eine Herstellung gleichartiger Körper möglich ist.

Die Extraktion der hergestellten Probekörper und die anschließende Bestimmung der Korngrößenverteilung zeigen, daß keine Kornzertrümmerung durch den Herstellungsprozeß eingetreten ist.

### 5.3 Ermittlung der Prüftoleranz unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen

Grundlage der Auswertung der Ergebnisse der Ringanalyse bildet die im Merkblatt „Statistische Auswertung“ (FGSV, 1982) beschriebene Vorgehensweise. Die Ergebnisse sind für die Scherkraft in den Tabellen A bis E und Tabellen 1 bis 14 in Anlage 1.4 aufgelistet. Die Ergebnisse der Scherwege sind in den Tabellen I/A bis I/E und den Tabellen I/1 bis I/14 der Anlage 1.4 zusammengestellt.

#### Korrektur der Meßbereiche

Zwischen dem verwendeten Mischgut aus den Vorversuchen und der späteren Anlieferung aus der Mischanlage für die „Großproduktion“ (1,5 Tonnen) stellten sich leichte Abweichungen des Bindemittelgehaltes bzw. der Asphaltkenndaten ein. Die Folge ist eine leichte Verschiebung der Meßbereiche bei gleich gewählter Verdichtung. Dennoch wird die gesamte Bandbreite der in der Praxis auftretenden Scherkräfte widerspiegelt. Die korrigierten Meßbereiche sind in Tabelle 5-7 zusammengetragen.

Tabelle 5-7: Korrigierte Meßbereiche

Meßbereich			
alt	neu	alt	neu
I	I	< 15	10 - 20
II	II	20 - 30	20 - 35
III	III	30 - 40	> 35
IV		> 40	( > 50)
V	IV	15 - 25	20 - 30
VI	V	25 - 35	(25) 30 - 40

Der ursprünglich gewählte Meßbereich IV liegt über 50 kN. Im Vergleich zu den praktisch auftretenden Scherkräften sind Werte über 50 kN kaum zu erwarten (Ausnahme bildet Gußasphalt<sup>3</sup>). Da bei 8 der 13 Prüfstellen in diesem Meßbereich die maximale Scherkraft von 50 kN überschritten wurde, liegen nur wenig auswertbare Ergebnisse vor. Deshalb wurde dieser Meßbereich nicht mehr in die Auswertung einbezogen. Da diese Erscheinung im Meßbereich III ebenfalls auf 3 Prüfstellen zutraf, konnten hier für die Auswertung nur die Ergebnisse von 10 Prüfstellen einbezogen werden.

---

<sup>3</sup> Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden Bohrkerne mit einer Deckschicht aus Gußasphalt abgeschert. Die maximale Scherkraft der Prüfpresse von 50 kN hat nicht ausgereicht, um die Deckschicht von der Binderschicht zu trennen.

### **5.3.1 Zusammenstellung der Einzelwerte**

Die von den teilnehmenden Prüfstellen mitgeteilten Einzelwerte für Scherkraft und Scherweg sind in den Tabellen A (für die Scherkraft) bzw. Tabelle I/A (für den Scherweg) in der Anlage 1.4 zusammengefaßt. Dabei ist jede Zelle ij in Unterzellen ijk unterteilt. Die Auswertung erfolgt für jedes Meßniveau (entsprechend den Meßbereichen I bis V) getrennt. Bei Prüfstelle 12, Meßniveau II (Scherkraft) fehlte ein Einzelwert aufgrund einer fehlerhaften Datenaufzeichnung. Da jedes Ergebnis aus zwei Einzelwerten ermittelt wurde und eine Mittelwertbildung nicht mehr möglich war, wurde gemäß Merkblatt der dazugehörige Einzelwert ebenfalls gestrichen. Beim Zusammenstellen der Einzelwerte für den Scherweg wurde festgestellt, daß insgesamt fünf Einzelwerte nicht angegeben waren:

Prüfstelle 11, Meßniveau I und II

Prüfstelle 12, Meßniveau II

Prüfstelle 9, Meßniveau III

Prüfstelle 5, Meßniveau IV.

Auch hier wurden die dazugehörigen Einzelwerte gestrichen.

### **5.3.2 Ausreißerprüfung der Einzelwerte**

Die Tabellen A bzw. I/A wurden nach offensichtlich fehlerhaften Einzelwerten geprüft. Prüfstelle 11 zeigte im Meßniveau I (Scherkraft) eine vergleichsweise niedrige Scherkraft von 9,90 kN. Aus dem Begleitprotokoll ging hervor, daß an diesem Probekörper die Schichtgrenze beim Abschersversuch nicht exakt getroffen wurde. Es handelt sich somit um einen fehlerhaften Einzelwert, der aus der weiteren Auswertung gestrichen wurde. Analog zum Vorgehen in Abschnitt 5.3.1 wird der dazugehörige Einzelwert ebenfalls gestrichen.

### **5.3.3 Errechnung der Streumaße der Einzelwerte**

Aus den übrigen Einzelwerten der Tabelle A bzw. I/A wurden die Standardabweichungen  $s_{ijk}$  berechnet und in Tabelle B bzw. I/B eingetragen.

### **5.3.4 Prüfung der Varianzen der Einzelwerte**

Die Prüfung der Varianz von Einzelwerten besteht aus der Ausreißerprüfung und der Homogenitätsprüfung. Die Ausreißerprüfung wird mit dem Cochran-Test durchgeführt. Er dient der Erkennung einer signifikant größeren Standardabweichung.

Die Prüfgröße lautet:

$$\hat{x}_c = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^{n_{ij}} s_{ijk}^2}$$

mit:  $\hat{x}_c$  – Prüfgröße  
 $s_{\max}$  – größte zu prüfende Standardabweichung

Der Schwellenwert wird dem Merkblatt „Statistische Auswertung“, Teil 4, Tabelle I (FGSV, 1982) entnommen. Er hängt von der Anzahl der Freiheitsgrade der Standardabweichungen und der Anzahl  $N_i$  ab. Als echter Ausreißer gilt die Standardabweichung, deren berechnete Prüfgröße den Schwellenwert übersteigt. Die Ergebnisse des Cochran-Tests sind in den Tabellen 1 bzw. I/1 aufgeführt. Es wurden bei den ermittelten Scherkräften keine Ausreißer festgestellt. Die Scherwege zeigten sowohl im Meßniveau III als auch im Meßniveau V eine Überschreitung des Schwellenwertes. Damit waren die größte Standardabweichung und die dazugehörigen Einzelwerte in Tabelle I/A als echte Ausreißer zu streichen.

Die Homogenitätsprüfung mit dem Bartlett-Test wurde nicht durchgeführt, weil die Voraussetzungen nicht erfüllt waren. Die Standardabweichungen der Einzelwerte der Scherwege wiesen in jedem Meßniveau mindestens einmal den Wert Null auf.

### 5.3.5 Zusammenstellung der Ergebnisse

Soweit die in Tabelle A bzw. I/A angegebenen Einzelwerte nicht gestrichen werden mußten, wurden aus ihnen die Ergebnisse  $x_{ijk}$  als arithmetisches Mittel gebildet und in Tabelle C bzw. I/C eingetragen.

### 5.3.6 Ausreißerprüfung der Ergebnisse

Die Ausreißerprüfung der zusammengestellten Ergebnisse erfolgt nach o.g. Merkblatt, Teil 2 mit dem T-Test. Für den jeweils größten ( $x_{ij(n)}$ ) und den kleinsten Wert ( $x_{ij(1)}$ ) jedes Meßniveaus wird die Prüfgröße nach folgenden Beziehungen ermittelt:

$$T_{\min} = \frac{\bar{x} - x_{ij(1)}}{s}$$

$$T_{\max} = \frac{x_{ij(n)} - \bar{x}}{s}$$

mit:  $\bar{x}$  = arithmetisches Mittel aller Werte  
 $s$  = Standardabweichung aller Werte  
 $x_{ij(n)}$  = größter Meßwert  
 $x_{ij(1)}$  = kleinster Meßwert

Die dazugehörigen Schwellenwerte für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 5% und 1% wird aus dem Merkblatt „Statistische Auswertung“, Teil 2, Tabelle 1 entnommen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 6 bzw. I/6 in Anlage 1.4 zusammengestellt. Die ermittelten Scherkräfte zeigten keine Ausreißer. Die ermittelten Scherwege der Prüfstelle 9 wurden als Ausreißer gemäß Merkblatt erkannt und für die spätere Auswertung gestrichen.

Bei genauer Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Meßniveaus fiel auf, daß mehr als zwei ausreißerverdächtige Meßwerte in der Meßreihe auftreten könnten. In einem solchen Fall können mit Hilfe des Ferguson-Tests Ausreißer erkannt werden. Auf der Seite der höheren oder auf der Seite der niedrigsten Meßwerte wird die Schiefe der Stichprobe nach folgender Formel berechnet:

$$\sqrt{b_1} = \frac{\sqrt{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[ \sum (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}}$$

Für Ausreißer auf beiden Seiten ist der Exzeß der Stichprobe zu ermitteln:

$$b_2 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[ \sum (x_i - \bar{x})^2 \right]^2}$$

Die Schwellenwerte sind den Tabellen 5 und 6 des Merkblattes „Statistische Auswertung“, Teil 2 zu entnehmen. Dort sind Schwellenwerte für  $\sqrt{b_1}$  und  $b_2$  für eine bestimmte Anzahl an Meßwerten (15, 20, 25 etc.) angegeben. Die in der hier durchgeführten Auswertung vorliegende Anzahl an Meßwerten liegt jedoch größtenteils dazwischen. Aus diesem Grund wurde mit den im o.g. Merkblatt angegebenen Wertepaaren für  $\sqrt{b_1}$  eine mathematische Funktion erstellt und der Schwellenwert für die gesuchte An-